

# Virtsan ravinteet kiertoon

**MORTTI -hankkeen loppuraportti**

**Riikka Malila, Eeva-Liisa Viskari ja Johanna Kallio**





# Virtsan ravinteet kiertoon

**MORTTI -hankkeen loppuraportti**

**Riikka Malila, Eeva-Liisa Viskari ja Johanna Kallio**



SUOMEN YMPÄRISTÖKESKUKSEN RAPORTTEJA 49 | 2019

Suomen ympäristökeskus

Kulutus ja tuotanto, kiertotalous/Kulutuksen ja tuotannon keskus

Kirjoittajat: Riikka Malila <sup>1)</sup>, Eeva-Liisa Viskari <sup>2)</sup>, Johanna Kallio <sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> Suomen ympäristökeskus

<sup>2)</sup> Tampereen ammattikorkeakoulu

Vastaava erikoistoimittaja: Ari Nissinen

Rahoittaja/toimeksiantaja: Sitra

Julkaisija ja kustantaja: Suomen ympäristökeskus (SYKE)

Latokartanonkaari 11, 00790 Helsinki, puh. 0295 251 000, syke.fi

Taitto: Riikka Malila

Kannen kuva: ©SLU

Julkaisu on saatavana veloitusetta internetistä: [www.syke.fi/julkaisut](http://www.syke.fi/julkaisut) | [helda.helsinki.fi/syke](http://helda.helsinki.fi/syke) sekä ostettavissa painettuna SYKEN verkkokaupasta: [syke.juvenesprint.fi](http://syke.juvenesprint.fi)

ISBN 978-952-11-5106-4 (nid.)

ISBN 978-952-11-5107-1 (PDF)

ISSN 1796-1718 (pain.)

ISSN 1796-1726 (verkkoj.)

Julkaisuvuosi: 2019

## TIIVISTELMÄ

### MORTTI-hankkeessa tutkittiin ravinteiden talteenottoa virtsasta

MORTTI -hankkeessa (Mobiili ravinteiden talteenotto kenttäolosuhteissa) selvitettiin ratkaisuja kenttäolosuhteissa syntyvien käymälätuotosten ravinteiden talteenottoon ja hyödyntämiseen. Virtsa ja uloste sisältävät paljon ravinteita ja niiden erottelu muista jätevesistä jo syntypaikalla mahdollistaa tehokkaan ravinteiden talteenoton ja hyötykäytön. Samalla säästetään käymäläjätevesien kalliissa kuljetuskustannuksissa jätevedenpuhdistamolle ja pienennetään kuljetuksista aiheutuvia päästöjä.

Hankkeessa testattiin uudentyyppisellä virtsan käsittelytekniikalla varustettua kenttäkäymälää. Virtsan ja ulosteen käsittelymenetelmien kartoituksen tuloksena pilotoitavaksi virtsan käsittelymenetelmäksi valikoitui Ruotsin maataloustieteellisen yliopiston (SLU) kehittämä alkalinen haihdutusmenetelmä, jossa virtsa imeytettiin tuhka-kalkkiseokseen ja ylimääräinen neste haihdutettiin pois. Ulosteen käsittelyyn valittiin tavanomainen kompostointi.

Hankkeen pilotointi toteutettiin Porin prikaatin (PORPR) harjoitusalueella Säkylässä. Kolmen kuukauden pilotointijakson aikana MORTTI -kenttäkäymälään rekisteröityi tuhatkunta käyttökertaa ja käymälässä käsiteltiin satoja litroja virtsaa. Virtsasta syntyi jauhemaista lopputuotetta, joka painoi alle kymmenesosan alkuperäiseen virtsaan verrattuna. Etenkin virtsan sisältämä typpi konsentroitui tehokkaasti lopputuotteeseen.

Lopputuotteesta (tuhka-kalkkiseos, johon virtsa imeytettiin) analysoitiin yli 300 orgaanista haittaainetta, lääkeainetta ja hormonia, ja niistä löytyi seitsemän määritysrajan ylittävää pitoisuutta. Suurin yksittäinen löydös oli ibuprofeeni, jonka pitoisuus oli yhdessä näytteessä lähes 20 mg/kg ka. Kadmiumin pitoisuus sen sijaan oli jo pelkässä tuhkassa korkeampi, kuin mitä maa- ja puutarhataloudessa käytettäviin lannoitevalmisteisiin sallitaan. Jotta lopputuotetta voitaisiin käyttää lannoitevalmisteena maa- ja puutarhataloudessa, niin tuhka-kalkkiseoksessa käytettävä tuhka ei saisi ylittää lainsäädännön kadmium -raja-arvoa. Metsälannoituksessa raja-arvo on korkeampi, mutta virtsaa sisältävää tuhka-kalkkiseosta ei olisi mahdollista käyttää, koska orgaanisen aineksen käyttö metsälannoituksessa ei ole nykyllä lainsäädännön mukaan sallittua.

Säkylän käymäläpilotin lisäksi hankkeessa tutkittiin virtsan konsentrointia ultrasuodatus- ja käänteisosmoosilaitteistolla sekä ulosteen pyrolysointia laboratoriomittakaavassa. Kalvosuodatuksessa syntyi tilavuudeltaan noin kymmenesosaan konsentroitua virtsakonsentraattia, johon virtsan ravinteet, mutta myös suolat konsentroituvat. Pyrolyysikokeissa ulostejae saatiin onnistuneesti käsiteltyä biohiiltä muistuttavaksi jakeeksi.

Sitran rahoittama hanke toteutettiin 1.9.2017 – 15.10.2019 Suomen ympäristökeskuksen (SYKE), Tampereen ammattikorkeakoulun (TAMK), Käymäläseura Huussi ry:n (KSH) ja Puolustushallinnon rakennuslaitoksen (PHRAKL) yhteistyönä. Hankkeessa oli tiiviisti mukana myös Puolustusvoimien logistiikkalaitos (PVLOGL) sekä SLU.

**Asiasanat:** jätevesi, jäteveden käsittely, virtsa, ulosteet, ravinteet, typpi, fosfori, haitalliset aineet, ibuprofeeni, kadmium, virtsan erotteleva käymälä, kiertotalous, talteenotto, syntypaikkaerottelu

## SAMMANDRAG

### MORTTI-projektet undersöktes näringsåtervinning från urin

MORTTI-projektet (Mobil näringsåtervinning under fältförhållanden) undersökte lösningar för utvinning och användning/utnyttjande av näringsämnen från toalettproduktion under fältförhållanden. Urin och avföring är rika på näringsämnen och deras separering från annat avloppsvatten vid källan möjliggör effektiv återvinning av näringsämnen. Samtidigt sparas kostnaderna för transport av avloppsvattnet till avloppsreningsverket och transportutsläppen minskar.

Projektet testade en ny typ av fälttoalett med urinbehandlingsteknologi. Som ett resultat av kartläggningen av urin- och fekalbehandlingsmetoder valdes för pilotstudien den alkaliska avdunstningsmetoden som utvecklats av Sveriges jordbruksuniversitet (SLU), där urinen absorberades av en aska-kalkblandning och överskottsvätskan avdunstade. Konventionell kompostering valdes för behandling av avföring.

Pilottoaletten testades i Björneborgs Brigads (PORPR) träningsområde i Säkylä. Under den tre månader långa pilotperioden registrerade MORTTI-fälttoaletten tusen användningar och behandlade uppskattningsvis hundratal liter urin. Av urinen uppstod en pulverformig slutprodukt som vägde mindre än en tiondel av den behandlade urinen. I synnerhet koncentrerades urinens kväve effektivt i slutprodukten.

Mer än 300 organiska föroreningar, läkemedel och hormoner analyserades i slutprodukten, av vilka sju stycken överskred analysgränserna. Det största enskilda medlet var ibuprofen i en koncentration något under 20 mg/kg ka. Kadmiumhalterna i askan var däremot högre redan på basen av bakgrundsmätningen, än vad som är tillåtet i gödningsmedel som används inom jordbruk och trädgårdsodling. För att slutprodukten ska kunna användas som gödningsmedel i jordbruk och trädgårdsodling, bör askan som används i aska-kalkblandningen inte överskrida den lagliga gränsen för kadmium. Gränsvärde i skogsgödsling är högre, men den urininnehållande aska-kalk blandningen bör inte användas, eftersom användning av organiskt gödslingsmaterial i skogsbruk inte är tillåtet enligt gällande lagstiftning.

Förutom Säkylä toalett-pilotförsök undersökte projektet också urinkoncentrering med hjälp av ultrafiltrerings- och omvänd osmosutrustning och pyrolys av avföring i laboratorieskala. Membranfiltrering resulterade i en koncentration på ungefär en tiondel av volymen av urinkoncentrat i vilket urinens näringsämnen men också salter koncentrerades. I pyrolysexperimentet behandlades avloppsfraktionen framgångsrikt som en bio-kolliknande fraktion.

Projektet, finansierat av Sitra, genomfördes under perioden 1 september 2017 till 15 oktober 2019 i samarbete mellan Finlands miljöcentral (SYKE), Tammerfors yrkeshögskola (TAMK), Toalett föreningen Huussi rf (KSH) och Finlands Försvarsförvaltningens Byggnadverk (PHRAKL). Försvarsmaktens logistikavdelning (PVLOGL) och SLU var också nära involverade i projektet.

**Nyckelord:** avloppsvatten, avloppsvattenhantering, urin, avföring, näringsämnen, kväve, fosfor, skadliga ämnen, ibuprofen, kadmium, urinseparerande toalett, cirkulär ekonomi, tillvaratagande, urin separation

## ABSTRACT

### The MORTTI project studied nutrient recovery from urine

The MORTTI project (Mobile Nutrient Recovery in Field Conditions) explored solutions for recovering and utilizing nutrients from source separated urine and faeces in field conditions. Urine and faeces are rich in nutrients and their separation from other wastewater at source enable efficient nutrient recovery. At the same time, the cost of transporting the wastewater to the wastewater treatment plant is saved and emissions of transport will be reduced.

A new type of field toilet with urine processing technology was tested in the project. As a result of the survey of the treatment methods for urine or faeces, the alkaline dehydration method developed by the Swedish University of Agricultural Sciences (SLU) was selected for piloting. In the method, the urine was absorbed into the ash-lime mixture and the excess liquid was evaporated. Conventional composting was chosen for the treatment of faeces.

The pilot toilet was tested in the training area of the Pori Brigade (PORPR) in Säkylä. During the three months testing, a thousand logs of use were registered in the MORTTI field toilet and hundreds of liters of urine were treated in the toilet. A powdery end product, that weighed less than one tenth of the original urine mass, was produced from urine. In particular, the urine nitrogen was effectively concentrated in the end product.

More than 300 organic micropollutants, pharmaceuticals and hormones were analyzed from the end product and only 7 of them were found exceeding the limit of identification. The substance with highest concentration was ibuprofen at a concentration slightly below 20 mg/kg ka. However, the cadmium content of the ash was higher than that permitted in fertilizers used in agriculture and horticulture. In order to use the end product as a fertilizer purposes in agriculture and horticulture, the ash used in the carrier should not exceed the cadmium limit of the legislation. In the case of forest fertilization, the limit value is higher, but it is not possible to use the urine-containing ash-lime mixture, as the use of organic material in forest fertilization is not permitted under current legislation.

In addition to the Säkylä pilot, the project carried out urine concentration tests with ultrafiltration and reverse osmosis system and tested pyrolysis of faecal matter in laboratory-scale. Membrane filtration resulted in a concentration of about one tenth of a volume of urine concentrate in which urine nutrients but also salts were concentrated. In pyrolysis experiments, the effluent fraction was successfully treated as a bio-carbon-like fraction.

The project, funded by Sitra, was implemented between September 1, 2017 and October 15, 2019 in cooperation between Finnish Environment Institute (SYKE), Tampere University of Applied Sciences (TAMK), Global Dry Toilet Association of Finland Huussi (KSH) and Construction Establishment of Finnish Defense Administration (PHRAKL). The Defense Forces Logistics Department (PVLOGL) and the SLU were also closely involved in the project.

**Keywords:** sewage, waste water treatment, urine, faeces, nutrients, nitrogen, phosphorus, harmful substances, ibuprofen, cadmium, urine separating toilet, circular economy, recovery, source separation





## ESIPUHE

MORTTI -hankkeessa (Mobiili ravinteiden talteenotto kenttäolosuhteissa) selvitettiin ihmisperäisten jätösten, virtsan ja ulosteen, sisältämien ravinteiden talteenottoa kenttäolosuhteissa ja niiden käsittelymahdollisuuksia hyötykäyttöä ajatellen. Hankkeen suunnittelu lähti liikkeelle Sitran Ravinnekierto Challenge 2016 -kilpailuun jätetystä ideasta, jossa ehdotettiin käymäläjätevesien ja etenkin virtsan ravinteiden talteenottoa varuskunnista. Ideaa jatkajalostettiin vuonna 2017, jolloin tahtotilaksi hahmottui prosessin siirrettävyys ja erityisesti varuskuntien harjoitusalueiden sanitaation kehittäminen.

Sitran rahoittama hanke toteutettiin 1.9.2017 – 15.10.2019. Hanketta koordinoi Suomen ympäristökeskus SYKE ja hankepartnereina toimivat Tampereen ammattikorkeakoulu TAMK, Käymäläseura Huussi ry (KSH) ja Puolustushallinnon rakennuslaitos (PHRAKL). Hankkeen työhön osallistui kiinteästi myös Puolustusvoimien logistiikkalaitos (PVLOGL). Hankkeen aikana tehtiin tutkimusyhteistyötä myös Ruotsin maataloustieteellisen yliopiston, Sveriges Lantbruksuniversitet (SLU), kanssa. Hankkeen pilotointi toteutettiin Porin prikaatin (PORPR) harjoitusalueella, Säkylässä.

Hanketta ohjasi ohjausryhmä, johon kuuluivat ympäristöneuvos (1.3.19 alkaen ohjelmapäällikkö) Tarja Haaranen ympäristöministeriöstä (pj), asiantuntija Hanna Mattila Sitrasta, neuvotteleva virkamies Pirjo Salminen maa- ja metsätalousministeriöstä, ympäristöasiantuntija Anna Kralik Puolustusvoimien logistiikkalaitoksen esikunnasta (PVLOGLE), Anna Mikola Aalto-yliopistosta, ylitarkastaja Marja Lehtolainen Ruokavirastosta sekä kehityspäällikkö Pertti Savela ProAgria Keskusten Liitosta.

Hankkeen aktiiviseen työryhmään kuuluivat idean alkuperäinen esittäjä Johanna Kallio (28.2.19 saakka) ja Riikka Malila SYKEstä, Eeva-Liisa Viskari ja Inka Honkala TAMK:ista, Sari Huuhtanen ja Susanna Pakula KSH:sta ja Eliisa Pärttö ja Nina Kokko PHRAKL:sta sekä Briitta Vilkki Puolustusvoimien 2. Logistiikkarykmentistä (2LOGR). Lisäksi hankkeen eri vaiheissa olivat mukana laboratorioinsinööri Seija Haapamäki ja harjoittelija Jani Haikonen TAMK:ista sekä Prithvi Simha, Caroline Karlsson ja Giulio Zorzetto SLU:sta.

Kiitämme lämpimästi hankkeen ohjausryhmää ja kaikkia hankkeen eri vaiheissa mukana olleita ja sen etenemistä edesauttaneita henkilöitä. Erityiskiitokset PORPR:n ja PHRAKL:n paikalliselle henkilöstölle Säkylässä avusta ja käymälävaunun huollosta.

Tampereella ja Helsingissä 20.11.2019

Tekijät



## SISÄLLYS

<b>1 Lähtötilanne .....</b>	<b>11</b>
1.1 Tausta ja tarve .....	11
1.2 Virtsan ja ulosteen koostumus .....	12
1.3 MORTTI -hanke .....	13
<b>2 Menetelmät käymäläjätevesien käsittelyyn .....</b>	<b>14</b>
2.1 Virtsan käsittelymenetelmät .....	14
2.1.1 Struviitin saostaminen .....	14
2.1.2 Kalvosuodatusmenetelmät .....	15
2.1.3 Biologinen nitrifiointi ja tislauk .....	16
2.1.4 Haihdutusmenetelmät .....	17
2.1.5 Elektrolyysi .....	18
2.1.6 Adsorptio .....	18
2.2 Ulosteen käsittelymenetelmät .....	19
2.2.1 Kompostointi .....	19
2.2.2 Kaasutus .....	20
2.2.3 Pyrolyysi .....	21
2.2.4 Torrefiointi .....	22
2.2.5 Märkähiilto (HTC) .....	23
2.3 Yhteenveto .....	23
<b>3 Kokeilut .....</b>	<b>24</b>
3.1 Virtsan käsittelypilotti Säkylässä .....	24
3.1.1 Alkukartoitus .....	24
3.1.2 MORTTI -kenttäkäymälän kuvaus .....	25
3.1.3 MORTTI -kenttäkäymälän käyttö, huolto ja näytteenotto .....	27
3.1.4 MORTTI -kenttäkäymäläpilotin tulokset ja niiden arviointi .....	27
3.1.4.1 Kenttäkäymälän kuormitus ja lopputuotteen ravinnemäärät .....	27
3.1.4.2 Näytteet tuoreesta virtsasta .....	28
3.1.4.3 Näytteet lopputuotteesta ja tuhka-kalkkiseoksesta (taustanäyte) .....	31
3.1.5 Käymälävaunun käyttäjäkokemukset .....	32
3.1.6 MORTTI -kenttäkäymälä verrattuna nykyjärjestelmään .....	34
3.2 Virtsan ultrasuodatus ja käänteisosmoosi -koeajo .....	36
3.2.1 Toteutus .....	36
3.2.2 Suodatuskokeiden tulokset ja niiden arviointi .....	36
3.3 Pyrolyysikokeet laboratoriossa .....	41
<b>4 Yhteenveto ja johtopäätökset .....</b>	<b>43</b>
4.1 Tulosten yhteenveto .....	43
4.2 Jatkotutkimustarpeet .....	44
4.3 Johtopäätökset .....	45



# 1 Lähtötilanne

## 1.1 Tausta ja tarve

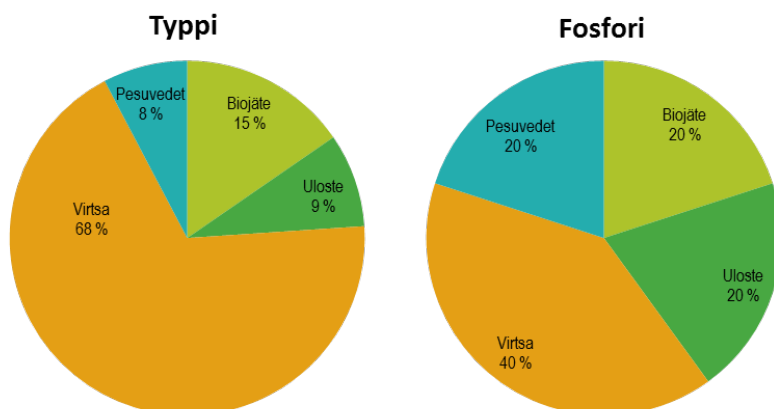
Tuotamme jokainen vuosittain virtsassa ja ulosteessa melkein viisi kiloa typpeä ja puolisen kiloa fosforia, joista vain murto-osa päättyy nykyisellään takaisin kiertoon. Tyytystä suuri osa karkaa jätevedenpuhdistamoilla joko ilmaan tai vesiin ja fosfori siirtyy lietteeseen heikkoliukoisessa muodossa, jolloin sen käyttökelpoisuus kasvien lannoitteena heikkenee.

Sekä fosforivarantojen ehtyminen maailmanlaajuisesti että energiaintensiivinen typpilannoitteiden valmistus kannustavat kierrättämään ravinteita ja etsimään uusia tapoja tuottaa turvallisia lannoitevalmisteita. Nykyisessä jätevesien käsittelyketjussa menetetään ravinteita ja/tai niiden käyttökelpoisuus lannoitteena heikkenee. Jätevedenpuhdistamoille tulevassa jätevedessä on sekoittuneena yhdyskuntien jätevesien lisäksi myös teollisuuden jätevesiä. Puhdistamolietteen peltokäyttö onkin viime aikoina kyseenalaistettu muun muassa lääk- ja haitta-ainejäämien takia.

Maailmanlaajuisesti arviolta vain noin 10 % käymälätuotosten ravinteista päättyy nykyisellään lannoitteeksi pelloille ja iso osa päättyy rehevöittämään vesistöjä (Cordell ym. 2009, Müllegger ym. 2010). Erottelemalla käymäläjätevesijakeet jo syntypaikalla, esimerkiksi alipaine- ja erottelevilla käymälöillä, on mahdollista saada ravinteet hyödynnettyä tehokkaasti ja puhtaampina. Jopa kaksi kolmannesta ihmisen tuottamien jätevesijakeiden tyytystä ja noin puolet fosforista on mahdollista saada talteen jakeiden erottelulla (Viskari ym. 2017). Samalla jätevedenpuhdistamoille johdettava ravinnekuormitus pienenee. Tällä on vaikutusta erityisesti typpiherkkien vesistöjen ravinnekuormitukseen, koska Suomessa jätevedenpuhdistamoiden keskimääräinen typenpoistoteho on vain n. 60 %.

Jos talteen otetuilla ravinteilla voidaan korvata kaupallisia lannoitteita, vähennetään myös niiden tuotantoa ja tuotannon ja lannoitteiden käytöstä aiheutuvia päästöjä. Jos verrataan nykyiseen jätevedenpuhdistukseen, niin erottelemalla ravinteet syntypaikalla saadaan tyytystä talteen viisinkertainen määrä ja fosforia suunnilleen sama määrä, mutta kasveille käyttökelpoisemmassa muodossa (Viskari ym. 2017). Lisäksi ravinteet ovat puhtaampia, koska niihin ei ole sitoutunut teollisuudesta ja muista haitallisista jätevesijakeista aiheutuvia haitta-aineita.

Suuri osa väestöstä viettää merkittävän osan valveillaoloajasta erilaisissa instituutioissa mm. työpaikoilla, kouluissa, oppilaitoksissa ja sairaaloissa. Näihin toimipisteisiin jää myös sanitaatiojäte. Valtaosa ihmisperäisten jätevesien ravinteista on virtsassa ja ulosteessa (kuva 1).



Kuva 1. Valtaosa ihmisperäisten jätevesien ravinteista on virtsassa ja ulosteessa.

Syntypaikkaerottelu mahdollistaa ravinteiden kierrätyksen raaka-aineiden valinnan siten, että raaka-aineiksi voidaan valita jakeita, joissa on lähtökohtaisesti mahdollisimman vähän haitta- ja lääkeainejäämiä. Puolustusvoimien palvelukseen osallistuvat tuottavat tässä suhteessa hyvälaatuista raaka-ainetta. Puolustusvoimien leiriolosuhteet toimivat myös luontevana paikkana testata syntypaikkaerotteluun kehitettyjä menetelmiä. Harjoittelu metsäolosuhteissa on olennainen osa puolustusvoimien toimintaa ja sitä toteutetaan puolustushaaroissa ympäri vuoden, eri paikkakunnilla.

Puolustusvoimat järjestää toimivan jätehuollon ja sanitaation myös leiriolosuhteissa. Kiinteiden ja kompostikäymälöiden lisäksi turvaututaan pääasiassa tapahtumakäymälöihin (esim. Bajamaja), joita mm. vuokrataan tilapäistä käyttöä varten. Tapahtumakäymälöiden jäte tyhjennetään yleensä imuautolla ja viedään jätevedenpuhdistamolle, mistä aiheutuu kustannuksia. Aikaisemmin kenttäkäymäläjäte (makkipakkijäte) toimitettiin pääsääntöisesti kaatopaikkasijoitukseen tai jätteenpolttolaitoksiin. Vuoden 2016 alussa voimaan tullut biohajoavan jätteen kaatopaikkakielto on merkittävästi vaikeuttanut makkipakkijätteen vastaanottoa, koska yhä harvempi jätelaitos voi tai haluaa ottaa sitä vastaan. Näiden syiden myötä on tunnistettu tarve kehittää sanitaatiota, eli ulosteen ja virtsan käsittelymenetelmiä, ravinteiden talteenoton tehostamiseksi ja kuljetuskustannusten pienentämiseksi.

## 1.2 Virtsan ja ulosteen koostumus

Yksi henkilö tuottaa keskimäärin noin 500 l virtsaa ja 50 kg ulosteita vuodessa. Virtsasta 95 % on vettä, ja loput ravinteita ja erilaisia yhdisteitä. Vuosittain tuotamme henkilöä kohti typpeä noin 4 kg ja fosforia noin 0,4 kg (taulukko 1). Suurin osa tyyppisestä virtsassa urean muodossa ja fosfori fosfaattioneina, molemmat kasveille käyttökelpoisessa muodossa. Virtsa sisältää pääravinteiden lisäksi myös mikroravinteita (esimerkiksi kalsiumia, magnesiumia, natriumia, mangaania, rautaa, sinkkiä, seleeniä ja kuparia) ja erilaisia suoloja, kuten kloridia ja sulfaattia. Kloridin määrä virtsassa voi olla varsin suuri, jopa useita grammoja litrassa (Pakula ym. 2016). Virtsan suuri vesimäärä on haaste sen hyödyntämiselle lannoituskäytössä.

Virtsan erilliskeräykseen, varastointiin ja kuljetukseen liittyy useita spontaaneja prosesseja, kuten urean hydrolyysi, saostuminen ja haihtuminen, joilla on merkittävä vaikutus virtsan koostumukseen. Näiden prosessien ymmärtäminen on olennaista sopivan talteenottomenetelmän valinnassa (Udert ym. 2006). Lähtökohtaisesti terveen ihmisen virtsa on steriiliä, eikä siinä ole taudinaiheuttajia. Toisaalta virtsa on hyvä kasvualusta mikrobeille. Ulosteperäisten mikrobien kontaminaatio tapahtuu yleisimmin virtsatiehyiden ulkopuolella (Pradhan 2010, WHO 2006). On tärkeää, että virtsan käsittelyssä noudatetaan huolellisuutta, ettei kontaminaatioita syntyisi. Virtsan ja käymäläkompostin lannoitekäytön mahdollisia terveysriskejä on tutkittu laajasti ja niiden käsittelyä ja käyttöä varten on laadittu WHO:n ohjeet (Pradhan 2010, WHO 2006). WHO:n ohjeiden mukaan virtsa on turvallista lannoitetta kuuden kuukauden varastoinnin jälkeen mille tahansa viljelykasville, kunhan virtsan lämpötila on varastoinnin aikana vähintään 20 astetta ja pH noin 9. Vain kuukaudenkin kestoinen varastointi virtsalle riittää, jos virtsalla lannoitetaan sellaisia ravintokasveja, joita ei syödä raakana. Varastoinnin aikana virtsassa oleva urea hydrolysoituu ammoniumiksi ja virtsan pH nousee  $\geq 9$ , mikä tuhoaa taudinaiheuttajamikrobit.

Käymäläjätöksissä, virtsassa ja ulosteessa, on käytännössä vain sellaisia yhdisteitä ja alkuaineita, joita saamme ravinnosta tai elimistömme joutuu muutoin. Koska esimerkiksi raskasmetalleja ei ympäristössä ja ravinnossa ole juurikaan, ei niitä ole myöskään virtsassa ja ulosteessa juurikaan havaittavissa. Olemme kuitenkin jatkuvasti alttiina monenlaiselle kemikaalialtistukselle, joten väistämättä myös virtsasta ja ulosteesta löytyy erilaisia kemikaaleja. Suurin osa ihmisen ravinnon mukana saamista raskasmetalleista poistuu elimistöstä ulosteiden mukana. Eläinten lantaan ja kemiallisiin lannoitteisiin verrattuna, virtsan raskasmetallipitoisuudet ovat alhaisempia (Winker ym. 2009, Jönsson ym. 2004). Ihmisten käyttämistä lääkeaineista keskimäärin kaksi kolmasosaa erittyy virtsan ja loput ulosteen kautta (Lienert ym. 2007). Huolenaiheena lannoitekäytössä ovat erilaisten lääkeaine- ja hormonijäämien mahdolliset riskit

sekä muut mahdolliset haitta-aineet, joiden esiintymisestä virtsassa ja käyttäytymisestä maaperässä on vielä vähän tietoa. Riski kemikaalijäämien kulkeutumiseen ravintoketjussa on selkeästi olemassa.

Taulukko 1. Yhden henkilön vuodessa tuottamat ravinnemäärät ja orgaanisen aineen määrä (BOD) (Valtioneuvosto 2017, Udert ym. 2006, Weckman 2005)

Jätevesijae	N (kg/hlö/a)	P (kg/hlö/a)	BOD (kg/hlö/a)
Virtsa	4,1	0,40	1,8
Uloste	0,5	0,21	5,5
Muu	0,4	0,15	11,0
<b>Yhteensä</b>	<b>5,0</b>	<b>0,76</b>	<b>18,3</b>

### 1.3 MORTTI -hanke

MORTTI -hankkeen tavoitteena oli edistää ravinteiden talteenottoa ja hyötykäyttöä syntypaikkaerotteen menetelmin ja kehittää tätä tukevia ratkaisuja kenttäolosuhteisiin. Varuskuntien harjoitusalueiden lisäksi muiksi sovelluskohteiksi tunnistettiin mm. erilaiset massatapahtumat kuten leirit, festivaalit ja muut suuret tapahtumat.

Niin ikään tavoitteena oli kehittää koekäymälä, jota pilotoitaisiin hankkeen aikana sopivalla puolustusvoimien harjoitusalueella. Mahdollisuuksien mukaan selvitettäisiin myös koekäymälässä syntyvän lopputuotteen hyödyntämismahdollisuudet.

Alkuperäinen hankesuunnitelma sisälsi seitsemän työpakettia:

- 1 Lähtötilanteen kartoitus
- 2 Menetelmävertailu
- 3 Virtsan koeajo ultrasuodatus-/käänteisosmoosilaitteistolla
- 4 Virtsan käsittelylaitteiston tekninen suunnittelu ja hankinta
- 5 Kiinteiden käymäläjätteiden käsittelylaitteiston tekninen suunnittelu ja hankinta
- 6 Laitteiston testaaminen harjoitusalueella
- 7 Lopputuotteiden analysointi ja tuotteistaminen

## 2 Menetelmät käymäläjätevesien käsittelyyn

Hankkeessa kartoitettiin menetelmiä virtsan ja ulosteen jatkojalostamiseen. Kartoitus tehtiin pääasiassa kirjallisuuden perusteella, mutta myös suullisia tiedonantoja hyödynnettiin tietojen täydentämiseen. Menetelmät on jaoteltu seuraavissa kappaleissa virtsan ja ulosteen käsittelymenetelmiin.

### 2.1 Virtsan käsittelymenetelmät

Virtsan käsittelylle voi olla erilaisia tavoitteita, kuten hygienisointi, tilavuuden pienentäminen, stabilointi, fosforin ja/tai typen talteenotto sekä ravinteiden poistaminen ja/tai mikropollutanttien poistaminen. MORTTI-hankkeessa kiinnostuksen kohteena oli ravinteiden, fosforin ja typen, talteenotto siten, että syntyvä lopputuote sisältäisi mahdollisimman vähän haitta-aineita ja ravinteet saataisiin talteen tehokkaasti.

Erilaisia käsittelymenetelmiä on tutkittu viimeisen kahdenkymmenen vuoden aikana runsaasti ja aiheesta on julkaistu lukuisia tieteellisiä tutkimuksia. Virtsan käsittelyssä haasteena on usein löytää käsittelymenetelmä, joka vastaisi useaan tavoitteeseen samanaikaisesti (Maurer ym. 2006, Mehta ym. 2015).

#### 2.1.1 Struviitin saostaminen

Struviitin saostaminen on mahdollisesti eniten käytetty menetelmä virtsan ravinteiden talteenotossa. Struviitti eli magnesiumammoniumfosfaatti ( $\text{MgNH}_4\text{PO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ), lyhennettynä MAP, on fosfaattim mineraali, joka sisältää fosfaatin lisäksi ammoniumtyyppiä ja magnesiumia. Struviittia muodostuu, jos fosforin, ammoniumtypen ja magnesiumin ionipitoisuudet sekä ympäristön olosuhteet ovat sopivia. Tärkeimmät tekijät ovat em. ioneista kylläinen liuos sopivissa moolisuhteissa ja emäksinen pH n. 8 – 10. Kolmas tärkeä tekijä on lämpötila, 25 – 90 °C. Struviittia saostuu jossain määrin itsestään virtsan varastoinnin aikana. Sivutuotteena muodostuu myös kalsiumfosfaattia.

Struviitti saostuu moolisuhteessa 1:1 fosfaattiin, mutta käytäntö on osoittanut, että magnesiumylimäärä 1:3 tuottaa optimituloksen (Tilley ym. 2008). Magnesiumin lähteenä käytetään magnesiumsuoloja ja kuten magneisumklorodia ( $\text{MgCl}_2$ ), magnesiumsulfaattia ( $\text{MgSO}_4$ ) ja magnesiumoksidia ( $\text{MgO}$ ). Kaupalliset struviitin talteenottomenetelmät, kuten Phosnix, Pearl Ostara, Phospaq, Seaborne, AirPrex ja Multiform, perustuvat näiden puhtaiden saostuskemikaalien käyttöön. Kemikaalitarve voi tehdä saostamisesta kallista ja on arvioitu, että prosessin kustannuksista jopa 75 % voi aiheutua magnesiumin hankinnasta. Muitakin magnesiumin lähteitä on tutkittu, kuten merivettä, merisuolan valmistuksen sivuvirtoja, magnesiittia ( $\text{MgCO}_3$ ) ja puutuhkaa, mutta ylivoimaisesti kilpailukykyisemmän korvaavan magnesiumlähteen löytäminen on ollut vaikeaa (Aguado ym. 2019, Kataki ym. 2016, Krähenbühl ym. 2015, Sakthivel ym. 2012, Wei ym. 2018).

Magnesiumin annostelun säätäminen sopivaksi on haasteellista, kun magnesiumsuoloja käytetään pieniä määriä. Magnesiumin sähkökemiallista annostelua on tutkittu ja sen on todettu olevan hinnaltaan kilpailukykyinen mm.  $\text{MgCl}_2$  ja  $\text{MgSO}_4$  käytön kanssa. Tutkimuksessa annostelutarkkuus todettiin hyväksi ja sähkökemiallinen magnesiumin lisäys voi olla pienissä, hajasijoitetuissa struviittireaktoreissa tavallista kemikaalilisäystä parempi vaihtoehto (Hug & Udert 2013).

Prosessissa saostuskemikaali lisätään virtsaan, sekoitetaan ja annetaan saostua. Struviittisakka erotetaan nesteestä suodattamalla. Yksinkertaisimmillaan struviitin saostus voidaan toteuttaa astiassa manuaalisesti ilman sähköä. Prosessimuuttujia kuten magnesiumin määrää, lämpötilaa, pH:ta sekä esikäsittelyä optimoimalla, voidaan saanto saada paremmaksi (Etter ym. 2015). Kiteyttämistä voidaan tehostaa kierrättämällä struviittikiteitä kiteytymisytimiksi (Maurer ym. 2006).



Kenttäkokeita on tehty mm. Etelä-Afrikassa, missä käsiteltiin 1 000 litraa virtsaa päivässä. Käymälöistä kerätty eroteltu virtsa toimitettiin erilliseen prosessiyksikköön. Koejärjestely oli manuaalinen, mutta käyttöhenkilökunnan helposti omaksuma. Kokeilu onnistui hyvin, vaikkakin struviitin saanto jäi odotettua alhaisemmaksi liian pienen magnesiumlisäyksen johdosta (Rhotona ym. 2014).

Etelä-Afrikassa on testattu myös struviitin saostusreaktorin automatisointia. 50 litran panosreaktori rakennettiin käytettäväksi manuaalisesti, puoli-automaattisesti ja automaattisesti, siten että reaktorin täyttö, magnesiumin täyttö ja struviitin suodatus voitiin automatisoida. Suodattimen vaihto tehtiin manuaalisesti. Samalla suodattimella pystyttiin valmistamaan jopa seitsemän struviittipanosta, mutta suodatusaika hidastui sitä enemmän mitä enemmän sakkaa suodattimessa oli. Suodatuksen todettiin olevan prosessin haastavin osuus. Samassa kokeilussa testattiin johtokyvyn ja sameuden mittausta prosessin automaattiseen ohjaukseen (Grau ym. 2015).

Menetelmän etuna on prosessin yksinkertaisuus ja helppo hallittavuus. Myös fosforin talteenotto-prosentti on hyvä, n. 93 % (Sakthivel ym. 2012). Struviitista on mahdollista tuottaa tasalaatuista tuotetta ja siitä on mahdollista valmistaa myös kaupallisia ravinnevalmisteita. Schürmannin ym. (2012) tutkimuksessa puolestaan todettiin, että yhtään virtsassa olleista lääkeaineista (bisoprolol, karbamatsepiini, klorkinoni, diklofenaakki, hydroklorotiatsidi, ibuprofeeni, metoprololi, nebivololi, sufadimidiini ja tramadol) ei löytynyt struviitista prosessin ja kuivaamisen jälkeen. Sen sijaan mikrobiologisesti kontaminoituneen virtsan sisältämät patogeenit eivät hävinneet struviitin valmistuksessa. Olosuhteita säätämällä patogeenien määrää on voitu vähentää ja mm. struviitin kuivaus on pienentänyt virusten määrää (Sakthivel ym. 2012).

Struviitin saostamisen ilmeinen haittapuoli on se, että menetelmällä saadaan talteen vain virtsan fosfori, typen talteenotto-prosentin ollessa alle 4 %. Struviitin saostaminen pienessä mittakaavassa on myös kannattamatonta. On arvioitu, että struviittisaostuksella virtsasta saadaan talteen noin 20 % virtsan ravinteiden markkina-arvosta, johtuen typpiyhdisteiden ja kaliumin menetyksestä. Menetelmän haasteena on myös se, että jäljelle jäävä nestejäte pitää vielä käsitellä ennen sen purkamista ympäristöön. Struviitin magnesiumpitoisuus on myös rajoittava tekijä lannoituskäytössä, joten struviitti ei sovellu ainoaksi lannoitteeksi. Struviitissa ravinteet ovat myös hidasliukoissa muodossa, mikä voi rajoittaa struviitin käyttökohteita lannoitteena. (Sakthivel ym. 2012, Etter ym. 2011, Naveed ym. 2018)

## 2.1.2 Kalvosuodatusmenetelmät

Kalvosuodatusmenetelmät ovat erotustekniikoita, jotka perustuvat tarkoitukseen valitun kalvon erilaisien molekyylien läpäisykykyyn. Kalvon läpi kulkeutuva aine on suodos (permeaatti) ja käsitelty, väkevöity jae on retentaatti. Kalvosuodatusmenetelmiä on lukuisia menetelmätyyppejä ja lisäksi markkinoilla on lukematon määrä erilaisia kalvoja.

Virtsan käsittelyyn kalvomenetelmiä voidaan ajatella käytettävän kahdella tavalla: Kalvotekniikalla poistetaan virtsasta vettä, jolloin virtsa väkevöityy tai sopivilla kalvovalinnoilla pyritään erottamaan virtsasta ravinteita, jolloin tavoitteena on erottaa orgaanisia haitta-aineita. Ensin mainittuun tarkoitukseen soveltuvat tiheät kalvot, kuten käänteisosmoosi, ja jälkimmäiseen esimerkiksi nanosuodatuskalvot. Tässä yhteydessä tarkastellaan kahta kalvosuodatusmenetelmää: ultrasuodatus ja käänteisosmoosi.

Puhdas vesi pyrkii normaalitilassa kulkemaan puoliläpäisevän kalvon läpi laimeammalta puolelta väkevämmälle puolelle (osmoosi). Ultrasuodatus ja käänteisosmoosi pohjautuvat siihen, että väkevämmälle puolelle kalvoa tuodaan painetta, jolloin vesimolekyylit kulkeutuvat väkevämmältä puolelta laimeammalle puolelle. Ultrasuodatus ja käänteisosmoosi ovat periaatteeltaan samantyyppisiä menetelmiä, ultrasuodatuksessa erotettavien aineiden molekyylipaino on suurempi (10 000 – 500 000) kuin käänteisosmoosisissa (alle 10 000). Ultrasuodatuskalvot ovat tyypillisesti edullisempia kuin käänteisosmoosikalvot, ja molempia on erilaisina laitetyppeinä, kuten putki-, levy- onttokuitu- ja spiraalimoduuleina (Mäkelä 2006).

Virtsan käänteisosmoosia on kuvattu Maurer ym. (2006) artikkelissa. Vanhennettuun virtsaan lisätiini happoa, jotta ammoniakki ei läpäise kalvoa. 50 barin paineessa virtsasta saatiin talteen 70 % ammoniumista, 73 % fosfaatista ja 71 % kaliumista. Käänteisosmoosiin perustuvaa ravinteiden talteenottoa on tutkittu myös laboratoriomittakaavassa. Tässä menetelmässä virtsan urea läpäisee kalvon ja konsentroiduu laimeammalle puolelle. Samalla virtsasta saostuu struviittia magnesiumionien siirtyessä kalvon läpi virtsaan (Volpin ym. 2018, Xie ym. 2016).

Nanosuodatusta on tutkittu virtsan haitta-aineiden erotukseen onnistuneesti (Pronk ym. 2006). Menetelmä ei pienennä virtsan tilavuutta, joten se ei vastaa MORTTI-hankkeessa toivottuun lopputulokseen.

Myös Aalto-yliopistossa kehitetyssä NPHarvest -menetelmässä hyödynnetään puoliläpäisevää kalvoa ravinteiden talteenottoon. Menetelmä soveltuu nestemäisten jätejakeiden ravinteiden talteenottoon ja se voidaan skaalata erilaisiin sovelluskohteisiin. Menetelmässä ammoniumtyyppi ( $\text{NH}_4^+$ ) muutetaan ammoniakiksi ( $\text{NH}_3$ ) nostamalla pH:ta kalsiumhydroksidin ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) avulla, jonka jälkeen ammoniakki erotetaan puoliläpäisevän kalvon läpi ja saostetaan ammoniumsulfaatiksi kierrättämällä rikkihappoa ammoniakkiliuoksessa. Prosessissa alkuvaiheessa fosfori saostetaan kalsiumsuolan avulla. Tyydestä on mahdollista saada talteen jopa 99 % ja fosforista 90 – 99 %. Menetelmää on vielä kehitysvaiheessa, mutta sitä on testattu hankkeen aikana useille eri syötteille, mm. mädätyksen rejektivesille, jätevedelle ja virtsalle. Menetelmän etuna on hyvä ravinteiden talteenottokyky, mutta mahdollisena haittana voi olla korkean pH:n omaava sivuvirta, jota syntyy yhtä paljon kuin käsiteltävää syötettä (Pradhan ym. 2019, Pradhan ym. 2018, Aalto-yliopisto 2019)

Yleisesti kalvosuodatukseen perustuvissa menetelmissä voidaan saavuttaa hyvä ravinteiden talteenottoaste. Lisäksi niissä syntyy tuotteen ohella useimmiten haitaton sivuvirta. Kalvomenetelmät eivät yleensä erottele tai poista mahdollisia virtsassa olevia epäpuhtauksia, kuten lääkeainejäämiä, metalleja ja suoloja, vaan ne konsentroituvat lopputuotteeseen. Haasteena voi olla myös suolojen kiteytyminen kalvon pintaan (Maurer ym. 2006). Kirjallisuudessa käyttökokemuksia kalvomenetelmien soveltamisesta virtsalle on raportoitu niukasti muutoin kuin laboratoriomittakaavassa.

### 2.1.3 Biologinen nitrifiointi ja tislauks

Virtsan jalostusta on tutkittu runsaasti EAWAG:ssa (Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology). Yksi kehitetyistä menetelmistä on biologisen nitrifioinnin ja tislauksen yhdistelmä, jossa virtsan tyyppiyhdisteet stabiloidaan nitrifioimalla ja nestetilavuutta pienennetään haihduttamalla vettä (Etter ym. 2015, Etter ym. 2011).

Menetelmän ensimmäisessä vaiheessa virtsa stabiloidaan biologisesti nitrifioimalla, jolloin osa virtsan ammoniakista muuttuu nitraatiksi. EAWAG on testannut nitrifikaatioon erilaisia laiteratkaisuja. Prosessi on herkkä hapetuksessa tarvittavien bakteerien, sekä pH:n suhteen (Udert & Wächter 2012). Uusimmassa laiteratkaisussa nitrifikaatioreaktorissa käytetään kantoainetta, jonka pinnalle muodostuvassa biofilmissä tapahtuvat typen reaktiot (Etter ym. 2015).

Toisessa vaiheessa virtsa tislataan. Tislauksessa 97 % virtsan vedestä poistuu ja suolat jäävät lopputuotteeseen. Nitrifioitua virtsaa tislatessa typen hävikki on vain 1,5 %, kun tislatessa vanhennettua virtsaa hävikki on 93 %. Lopputuotteena on nestemäinen, ravinnepitoinen liuos, jonka tilavuus on kolme prosenttia alkuperäisen virtsan tilavuudesta (Etter ym. 2015). Menetelmällä olisi mahdollista tuottaa myös kiinteää lopputuotetta, mutta on havaittu, ettei se ole termisesti stabiilia. EAWAG:n spin-off-yhtiö VUNA on tuotteistanut nestemäisen lopputuotteen tuotenimellä ”Aurin”, jota myydään puolen litran pulloissa. Tuotetta saa myydä ja käyttää muiden kuin syötävien kasvien lannoitukseen kotitalouskäytössä (VUNA Aurin Product Label).

Menetelmää on tutkittu sekä EAWAG:n laboratoriossa että Etelä-Afrikassa kahdessa pilotkohteessa. Laitteiston kapasiteetti oli noin 50 l/d. Prosessiparametreja optimoitiin kolmen vuoden ajan. Prosessi todettiin stabiiliksi ja tuote tasalaatuiseksi (Etter ym. 2015). EAWAG:n Sveitsin yksikkö on

kokeillut laitteistoa myös paikallisilla Olma -maatalous- ja ruokamessuilla kymmenen päivän ajan. Kokeilussa käytettiin messuyleisön virtsaa (Etter ym. 2015).

Nitrifiointi ja tislaus -menetelmän ehdoton etu on lähes täydellinen ravinteiden talteenotto ja puhtaan sivuvirran tuotanto. Tislaus takaa myös sen, ettei lopputuotteessa ole lainkaan mikrobeja. Menetelmän haittapuolena on haastava prosessinohjaus ja seuranta. Prosessi tarvitsee myös jatkuvan raaka-ainesytön ja sen arvioidaan olevan stabiili vain suurissa yksiköissä. Menetelmä tarvitsee myös paljon energiaa. On arvioitu, että energiatarve on nelin-viisinkertainen verrattuna perinteisen jätevedenpuhdistuksen ja vastaavan keinolannoitemäärän valmistukseen verrattuna. (Etter ym. 2011, Etter ym. 2015, Schurmann ym. 2012)

## 2.1.4 Haihdutusmenetelmät

Virtsan haihdutukseen liittyviä menetelmiä on tutkittu mm. Ruotsissa SLU:ssa (Sveriges Lantbruksuniversitet). Esikäsittelyvaiheena ennen haihdutusta on tutkittu virtsan alkalista stabiloimista ammoniakkin haihtumisen estämiseksi (Simha ym. 2018a, Senecal & Vinnerås 2017).

Ioninvaihto ja haihdutus -menetelmässä tuore virtsa alkaloidaan johtamalla se ioninvaihtimena toimivan hartsipedin läpi, jonka jälkeen se johdetaan emäksiseen kantoaineeseen (puun tuhka tai alkaloitu biohiili) ja kuivataan. Menetelmää on tutkittu eri lämpötiloissa (tuhka 40 ja 50 °C, biohiili 45 °C) ja eri tekijöiden vaikutusta kuivaukseen on mallinnettu ja mm. kuivausnopeutta optimoitu. Yli 75 % virtsasta tulee johtaa ioninvaihtimen läpi, jotta tuoreen ja ionivaihdetun virtsaseoksen pH nousee yli 10. Hartsin toimi tehokkaana alkaloijana, mutta osa fosforista (35 %) sitoutuu käsittelyn aikana siihen. Hartsin tarve on myös melko suuri (hartsi:virtsa = 1:5). (Simha ym. 2018a)

Kuivauksessa on saatu aikaan yli 90 % massan pieneneminen, yli 70 % typen talteenotto ja 100 % fosforin ja kaliumin talteenotto (lukuun ottamatta P:n sitoutumista hartsiin). Tehokkain prosessi aikaan saatiin tuhalla (50 °C) ja virtsan annostelulla 12 l/m<sup>2</sup>, joka mahdollistaa nelihenkisen perheen kuukaudessa tuottaman virtsamäärän kuivauksen alle kilon tuhkamäärällä reilussa neljässä päivässä. Menetelmän etuna on erinomainen ravinteiden talteenottopotentiaali sekä täysin haitaton sivuvirta. Menetelmän haasteena on sen kehittymättömyys ja manuaalisen ohjauksen tarve. Menetelmään liittyvää tutkimusta tehdään parhaillaan laboratoriomittakaavassa, mutta SLU:lla on suunnitelmia siirtää prosessi pilotmittakaavaan. (Simha ym. 2018a)

Alkalinen haihdutusmenetelmä, joka on myös SLU:ssa kehitetty, on samankaltainen kuin edellä kuvattu ioninvaihto ja haihdutus -menetelmä. Menetelmässä tavoitellaan virtsan käsittelyä säiliöyksikössä. Virtsa imeytetään puutuhkaan tai muuhun soveltuvaan kantoaineeseen, joka nostaa virtsan pH:n ja ehkäisee ammoniakkin haihtumista. Samalla laitteistoon johdetaan lämmintä ilmaa, jonka seurauksena neste haihtuu. Lopputuotteena saadaan jauhomainen lopputuote, johon virtsan ravinteet ovat sitoutuneet. Haihdutettu vesi voidaan kondensoida ja johtaa maaperään tai tarvittaessa jatkokäsittellä. (Senecal & Vinnerås 2017)

Menetelmällä saadaan talteen jopa 64 – 90 % tyyppistä sekä 100 % fosforista. Kantoaineen tarve on noin 1 kg / 20 litraa virtsaa. Lisäksi virtsan massareduktio on jopa 95 %. Menetelmän etuna on erinomainen ravinteiden talteenotto, sekä täysin haitaton sivuvirta. Menetelmän haasteena on sen kehittymättömyys ja manuaalisen ohjauksen tarve (Senecal & Vinnerås 2017) Käyttökokemuksia tuhkapohjaisesta haihdutuksesta on laboratoriomittakaavassa, mutta pilottikokeita on meneillään mm. EU-rahoitteisessa Run4Life -hankkeessa (EU Horizon 2020 Research and Innovation programme 2019).

Haihdutukseen perustuvaa menetelmää on testattu myös vietnamilaisessa asuntolassa, jossa hyödynnettiin aurinkoenergiaa virtsan haihdutukseen. Lopputuote koostui 90 %:sti natriumkloridista ja sisälsi 3 % rikkiä, 2 % typpeä ja 2 % fosforia. Kokeen yhteydessä tutkittiin myös virtsan stabilointia happamoittamalla. Stabiloinnin seurauksena lopputuotteen ravinnepitoisuudet kasvoivat. Lopputuotteen turvallisuus haitta-aineiden ja patogeeneiden osalta vaatii lisätutkimuksia (Antonini ym. 2012)

## 2.1.5 Elektrolyysi

Elektrolyysiin perustuvia virtsankäsittelymenetelmiä on tutkittu lukuisia ja elektrolyysiä voidaan käyttää eri tarkoituksiin. Tässä tarkastelussa menetelmät on jaettu ensisijaisen tarkoituksen mukaan. Elektrolyysiä on tutkittu EAWAG:ssa kolmeen eri käyttötarkoitukseen: ammoniakkin ja orgaanisten aineiden hajotukseen epämiellyttävän hajun poistamiseksi, yhdistettynä biologiseen nitrifikaatioon ylijäämänitriitin poistamiseksi, sekä magnesiumielektrodina struviitin saostuksen hienosäädössä. Elektrolyysin todettiin onnistuneesti vastaavan kuhunkin käyttötarkoitukseen (Etter ym. 2015; Schurmann ym. 2012).

Wetsus-tutkimuskeskus (European Centre of Excellence for Sustainable Water Technology) on tutkinut elektrolyysiä typen talteenottomenetelmänä. Elektrolyysiä on käytetty ammoniakkin strippaukseen virtsasta, jossa kaasufaasiin siirtyvä ammoniakki on otettu talteen happoon. Menetelmä on energiaposiitiivinen eli tuottaa energiaa (Kuntke ym. 2012).

Elektrolyysiä on tutkittu myös typpi yhdisteiden talteenottomenetelmänä sen jälkeen, kun virtsasta on saostettu struviittia. Puoli vuotta kestäneessä laboratoriokokeilussa typpeä otettiin talteen ammoniumsulfatina struviittiprosessin rejektistä. Kokonaistypen talteenotto oli  $31 \pm 59 \%$  ja energiantarve  $4,9 \pm 1,0 \text{ MJ/kg N}$  (Zamora ym. 2017) eli vain noin viidenneksen verrattuna typen valmistukseen Haber-Bosch -menetelmällä (Wang ym. 2018).

Elektrolyysi ei ole yksi tietty menetelmä ja käyttötarkoituksesta riippuen elektrolyysiä voidaan käyttää ravinteiden poistamiseen, tietyn ravinteen talteenottoon, sekä osana muuta käsittelyprosessia. Elektrolyysin haittana on menetelmien kypsymättömyys. Käyttökokemuksia elektrolyysistä on lähinnä laboratoriomittakaavassa.

## 2.1.6 Adsorptio

Virtsan adsorptiossa halutut ravinteet otetaan talteen väliaineeseen. Useita laboratoriotutkimuksia on tehty aktiivihiiilen käytöstä virtsan adsorptioon (Simha ym. 2018b, Simha ym. 2016, Ganesapillai ym. 2016, Ganesapillai ym. 2015). Aktiivihiiilenä korvikkeena on käytetty mm. maatalouden sivutuotteena syntyvää kookoskuorijätettä.

Eräässä tutkimuksessa virtsa vanhennettiin ja johdettiin adsorptiokolonniin syöttönopeudella 6 l/h. Tutkimuksessa selvitettiin kookoskuoripedin korkeuden ja virtsan syöttönopeuden ja konsentraation vaikutusta talteen otetun urean määrään. Menetelmällä saatiin talteen noin 80 % ureasta ja siihen voidaan yhdistää struviitin saostus magnesiumoksidilla, jolloin myös fosforia saadaan otettua talteen. Struviitin saostus tapahtuu adsorption jälkeen omana prosessivaiheenaan (Ganesapillai ym. 2016).

Menetelmänä virtsan adsorptio on vielä varsin kehittymätön ja käyttökokemuksia on lähinnä laboratoriomittakaavassa. Menetelmän haasteena on prosessin manuaalinen operointi. Menetelmällä saadaan typpeä otettua talteen, mutta fosforin talteenotto edellyttää menetelmän yhdistämistä esimerkiksi struviitin saostukseen. Lopputuotteen mikrobiologisesta laadusta tai haitta-aineista ei ole tietoa.

## 2.2 Ulosteen käsittelymenetelmät

Ihmisulosteen kuiva-ainepitoisuus on tyypillisesti 18 – 30 % (Rose ym. 2015) ja kuiva-aineesta noin 83 % on orgaanista ainetta ja 17 % tuhkaa (Onabanjo ym. 2016). Ulosteen käsittelymenetelmät voidaan jakaa karkeasti biologisiin prosesseihin, kuten kompostointi ja mädätys, sekä termokemiallisiin prosesseihin, kuten poltto, kaasutus, pyrolyysi ja torrefiointi.

Seuraavassa käsitellään tarkemmin kompostointia, kaasutusta, pyrolyysiä, torrefiointia ja hydrotermistä käsittelyä (märkähiilto). Käytännössä poltto eli biomassan täydellinen hapettaminen hiilidioksidiksi ja vedeksi sisältää kaikkia termisten prosessien osia (torrefiointi, pyrolyysi ja kaasuuntuminen) vaihteittain palamisen edetessä. Prosessit ovat myös osittain päällekkäisiä. Termokemiallisia menetelmiä edeltää märkähiiltoa lukuun ottamatta yleensä biomassan kuivaus, joka voidaan määritellä kemiallisesti sitoutumattoman veden poistamisena biomassasta (Pitkänen & Sikanen 2014). Mädätys ja suora poltto jätettiin kuitenkin tarkastelun ulkopuolelle, koska niiden toteuttaminen kenttäolosuhteissa arvioitiin liian haastavaksi.

### 2.2.1 Kompostointi

Kompostointi on biologinen prosessi, jossa mikrobit hajottavat eloperäistä ainesta hapellisissa olosuhteissa. Kompostoituminen vaatii sopivassa suhteessa hiiltä, happea, typpeä ja vettä. Eloperäisen aineen hajotessa muodostuu vesihöyryä, hiilidioksidia ja muita haihtuvia yhdisteitä kuten ammoniakkia, metaania ja typpioksiduulia sekä ravinteita, humusta ja lämpöä. Riittävä kosteus ja ravinteiden saanti sekä oikea hiili-typpisuhde, n. 25:1 – 30:1, on tärkeää kompostoitumisen onnistumiselle. Kuivikkeen avulla voidaan säädellä ravinnesuhteita, kosteustasapainoa ja hapensaantia. Kuivike imee myös ylimääräistä kosteutta, kuohkeuttaa massaa, on hiilipitoinen energianlähde pieneliöille, ehkäisee hajuhaittoja ja toimii peiteaineena estäen karpästen lisääntymistä käymäläjätteessä. Kuivikkeeksi soveltuvat monet eloperäiset aineet, kuten puuperäinen jäte. (Käymäläseura Huussi ry 2019, Eliades 2019)

Tavanomainen kompostointiprosessi kestää 6 – 12 kk, mutta ns. tehostetussa, pika- tai termofiilissä kompostoinnissa kompostin kypsymisaikaa voidaan lyhentää merkittävästi jopa alle kuukauteen. Tällöin erityisen tärkeää on oikea hiili-typpisuhde, jotta kompostin lämpötila pysyy jatkuvasti vakiona (n. 55 – 65 °C). Liian korkealla C:N -suhteella prosessi on hidas ja liian matalalla liian nopea. Oikealla C:N -suhteella lopputuotteen määrä on suunnilleen sama kuin alkuperäisen kompostoitavan massan. Kompostimassaa voidaan myös lämmittää ja sitä tulee sekoittaa esim. kääntämällä säännöllisesti kompostoitumisen edistämiseksi. Kompostoituminen tuottaa lämpöä ja sitä voidaan myös hyödyntää kompostin pitämiseksi lämpimänä tai jopa ottaa talteen. (Smith ym. 2016, Anand & Apul 2013)

Kompostoinnissa lämpötila nousee hyvin nopeasti jopa yli 70 °C:een ja laskee sitten vähitellen ympäristön lämpötilaan. Alkuvaiheessa kompostin pH laskee hieman orgaanisten happojen muodostuessa, mutta alkaa nopeasti nousta happoja aineenvaihdunnassaan hyödyntävien mikrobien lisääntyessä sekä proteiinien hajotessa. Kompostoinnin loppuvaiheessa (kun komposti on kypsää) sen pH on tyypillisesti 7 – 8. Lämpöhuipun aikana voi haihtua huomattavia määriä typpeä ammoniakkina, joka on prosessin hallinnan kannalta ei-toivottu tapahtuma. Kompostoinnin alkuvaiheessa hajoavat helposti mikrobien käytettävissä olevat yhdisteet (esim. sokerit) ja vaikeasti hajoavat komponentit (esim. ligniini) hajoavat vasta prosessin loppuvaiheessa. (Albers ym. 2003)

Hapelliset olosuhteet ja lämpötilan nousu tuhoavat mahdollisia taudinaiheuttajia. Loisten munat ja normaalit suolistobakteerit tuhoutuvat 45 – 50 -asteessa. Haitallisten suolistobakteerien ja virusten tuhoutuminen saattaa kuitenkin vaatia 60 – 70-asteen lämpötilan, johon kylmällä säällä päästään yleensä vain kompostin keskellä. Suolistobakteereita tuhoaa myös bakteerien välinen kilpailu. Muiden haitta-aineiden, esimerkiksi lääkeaineiden, palonestoaineiden (PBDE), pintakäsittelyaineiden (PFAS) ja epätydellisessä palamisessa syntyvien PAH-yhdisteiden kohtaloa kompostointiprosessissa ei tunneta riittävästi. Toisaalta syntypaikkaeroteltua ihmisulostetta kompostoitessa huolenaiheena ovat lähinnä lääkeaineet ja hormonit sekä antibioottiresistenssi (Vinnerås 2007, LUKE 2018)

Käymäläjätteen kompostointi kiinteistökohtaisesti mökeillä ja loma-asunnoilla on varsin yleistä. Tähän tarkoitukseen on kehitetty useita erilaisia kompostoivia käymälöitä, jotka eroavat toisistaan mm. sähköön käytön, säiliöiden määrän, virtsan erottelun ja veden käytön suhteen. Tutkimustuloksia näiden käytännön toimivuudesta todellisissa kohteissa on kuitenkin hyvin vähän, jos ollenkaan. Kompostointiin vaikuttavat tekijät ovat kyllä hyvin tiedossa, mutta teoriaa ei nykyisellään hyödynnetä riittävästi käytännön sovelluksia kehitettäessä. Myös kotikompostojien osaamistaso vaihtelee. Ihmisen ulosteen hiili-typpisuhde on melko alhainen, ollen noin 8. WC-paperin C:N -suhde on 200:1 – 350:1 ja kuivikkeista esim. sahanpurun 190:1. Näillä pelkän ulosteen kompostoinnin ravinnesuhdetta saadaan nostettua optimaalisempaan suuntaan (Anand & Apul 2013).

Tampereen Hiedanrannassa toimivaan Kuivaamo-tapahtumatilaan on rakennettu Digi Toilet Systems (DTS) Oy:n toimesta virtsan erotteleva käymäläjärjestelmä, jossa virtsa otetaan talteen ja kiinteät jätteet käsitellään ns. DTS-menetelmällä, jossa valmista lopputuotetta syntyy jopa vuorokaudessa. Menetelmä muistuttaa läheisesti lämpökompostointia. Menetelmän lämpökäsittelyn myötä aineksesta syntyy hygieniavaatimukset täyttävää maanparannusainetta ns. Hietsun mustaa. DTS Oy on saanut Ruokavirastolta laitoshyväksynnän valmistusprosessille, eli kompostoinnille ja rakeistukselle, lokakuussa 2019.

Suomessa on toiminnassa useita suuremman mittakaavan kompostointilaitoksia, joissa kompostoidaan mm. puhdistamoliettteitä. Tällä hetkellä on toiminnassa 14 kompostointilaitosta ja lähes 100 aumakompostointikenttää (Vilpanen & Toivikko 2017). Pelkästään käymäläjätteitä kompostoivia laitoksia ei kuitenkaan tiettävästi ole olemassa Suomessa, eikä muuallakaan maailmassa, eikä pelkän käymäläjätteen kompostoinnista ole näin ollen olemassa laitosmittakaavan käyttökokemuksia.

Kompostointiprosessin etuja ovat melko yksinkertainen ja optimaalisissa olosuhteissa spontaanisti käynnistyvä prosessi sekä alhainen energiankulutus. Haittoja ovat tavanomaisen kompostoinnin hidas prosessi (6 – 12 kk) ja suuri tilantarve sekä haihtuvien yhdisteiden, kuten kasvihuonekaasujen ja ammoniakkin hallinta. Spontaanissa kompostointiprosessissa voidaan menettää jopa 17 – 94 % tyypestä ja 80 % hiilestä. Termofiilisellä kompostoinnilla prosessia voidaan tehostaa, mutta se vaatii jonkin verran enemmän työtä/automaatiikkaa, mm. kompostin tiheän kääntämisen takia. Lämpökompostoinnissa madon munat ja patogeenit tuhoutuvat tehokkaammin kuin tavallisessa kompostoinnissa. Lämpökompostoinnin lopputuote on myös hienojakoisempaa ja pidemmälle hajonnutta. Termofiilisessä kompostoinnissa myös typpihävikki voi olla alhaisempi kuin tavanomaisessa, koska lämpötila on liian korkea tyypeä ammoniakiksi hajottaville bakteereille (Anand & Apul 2013).

## 2.2.2 Kaasutus

Kaasutus on korkeassa lämpötilassa, 500 – 850 °C, vähähappisissa olosuhteissa tapahtuvaa epätäydellistä polttoa. Prosessin tuotteena syntyy synteetikaasua, pääasiassa vetyä ja hiilimonoksidia, sekä biohiiltä ja tuhkaa. Hapen tarve on noin kolmannes verrattuna suoraan polttoon. Kaasutuksessa biomassaa muutetaan yleensä kiinteästä kaasumaiseen, energiaa sisältävään muotoon, jossa pääreaktio on seuraava;  $C + H_2O \rightarrow CO + H_2$  (Pitkänen & Sikanen 2014). Kaasutuksen tavoitteena on tuottaa energiaa ja vähentää alkuperäisen syötteen määrää.

Kaasutuksessa vesi on aktiivinen ja välttämätön komponentti. Biomassasta kemiallisesti vapautuva vesi riittää yleensä hyödyntämään biomassan sisältämän hiilen kaasutusreaktiossa. Koska reaktio on tasapainossa (kaikki vesi ei reagoi hiilen kanssa), pieni, alle 20 % kosteus kaasutettavassa biomassassa ei ole haitaksi. Tätä suurempi kosteus alkaa vaatia enemmän lämpöä kuivaukseen (Pitkänen & Sikanen 2014).

Onabanjo ym. (2016) mallinsivat termodynaamisella analyysillä ihmisulosteen kaasutusta. Mallinnuksen kohteena oli Englannissa, Cranfieldin yliopistossa on kehitetty (Onabanjo ym. 2016) energia- ja vesiomavarainen käymälä, joka soveltuu yhden kotitalouden tarpeisiin ja jossa ulostejae kaasutetaan

pienessä kaasuttimessa. Tulosten perusteella tuoreen ulosteen maksimaalinen talteen otettavissa oleva energiamäärä kaasutuksessa oli noin 13 – 15 MJ/kg.

Kaasutuksessa menetetään typpi ja hiili. Kaasutus poistaa tehokkaasti orgaanisia haitta-aineita, lääkeaineita ja muoveja, mutta PAH-yhdisteitä voi muodostua. Myös raskasmetallit sitoutuvat tuhkaan, mutta elohopea poistuu suurimmaksi osaksi. Fosfori jää tuhkaan, mutta sen käyttökelpoisuus lannoitteena on kyseenalainen (Nissinen 2019).

### 2.2.3 Pyrolyysi

Pyrolyysi (hiilestäminen) on biomassan hajottamista hapettomissa oloissa lämmön avulla. Biomassasta kaasutetaan haihtuvat ainesosat muutamien satojen asteiden lämpötilassa. Lämpötila on yleensä alle 700 °C, ja vaihteluväli on tyypillisesti 250 °C – 700 °C. Lopputuotteina syntyy biohiiltä, bioöljyä ja synteetikaasua. Prosessilämpötilalla voidaan vaikuttaa syntyvien lopputuotteiden määrään sekä niiden väliin suhteisiin. Yleisesti ottaen, mitä kuumempi lämpötila, sen vähemmän biohiiltä syntyy ja suurempi osa kaasuntuu. Kiinteä lopputuote, biohiili, sisältää syötteestä riippuen hiiltä, tuhkaa ja epäorgaanisia suoloja. Yhdyskuntajätevesiliete ja uloste sisältävät puupohjaisia biomassoja enemmän tuhkaa ja syntyvä lopputuote sisältää vähemmän hiiltä, noin 35 – 45 % (Pitkänen & Sikanen 2014, Liu ym. 2014, Yacob ym. 2018).

Pyrolyysitekniikoista erityisesti hidas pyrolyysi soveltuu kiinteän biohiilen valmistukseen muita prosesseja huomattavasti suuremman biohiilisaantonsa vuoksi. Hiilen määrä ja syötteen kosteus ovat oleellisia prosessin kannattavuudelle. Hitaassa pyrolyysissä taloudellisesti järkevä kosteuspitoisuus vaihtelee alle 15 %:sta aina jopa 70 %:iin. Lopputuotteen tyypillinen jakauma puumateriaalilla on noin 35 % biohiiltä, 30 % bioöljyä ja 35 % synteetikaasua (Strand 2011). Pyrolyysissä mahdolliset raskasmetallit päätyvät biohiilijakeeseen. Märän massan pyrolysointi ei ole järkevää millään laitetypillä, jos halutaan tuottaa energiaa hiilen valmistuksen ohella. Veden poistaminen vie neljäsosan raaka-aineen energiasta ja tekee prosessin energiatuotannon kannalta hyödyttömäksi (Kujala 2012, Laitinen 2015).

Tällä hetkellä yhdyskuntalietteiden pyrolysointiin on nouseva kiinnostus ja Suomessa on meneillään esimerkiksi HSY:n vetämä RAKI hanke, Hiiltämällä jätevesilietteen ravinteet kiertoön, joka valmistuu vuoden 2020 lopulla. Viime keväänä päättyneen PProduct-hankkeen tulosten perusteella pyrolyysin on havaittu pienentävän lähes kaikkien tarkasteltujen haitta-aineyhdisteiden pitoisuuksia merkittävästi, mutta muutamien yhdisteiden pitoisuudet kasvoivat. Erityisesti näiden yhdisteiden osalta olisi tärkeää jatkossa tutkia, miten prosessoinnilla voitaisiin vaikuttaa aineiden käyttäytymiseen (LUKE 2018).

Ihmisjätöksien pyrolysointia on tutkittu myös maailmalla, mutta huomattavasti vähemmän kuin esimerkiksi lantapohjaisten biomassojen. Liu ym. (2014) pyrolysoivat esikuivattua saostuskaivolietettä ja tutkivat sekä syötteen että tuotetun biohiilen ominaisuuksia eri parametreilla. Lämmitysnopeus oli 15 °C/min ja pyrolyysilämpötila vaihteli 300 – 700 °C. Tulosten perusteella ihmisperäisestä lietteestä saadaan tuotettua hyvälaatuista biohiiltä ja prosessi on energiaomavarainen, mikäli syötteen kosteus on alle 57 % (pyrolyysilämpötila 550 °C). Shinogi & Kanri (2003) tutkivat muun muassa yhdyskuntajätevesilietteen pyrolysointia. Korkean tuhka- ja epäorgaanisten aineiden pitoisuuden takia lopputuotteena syntyvä biohiili sisältää paljon myös epäorgaanisia suoloja kuten fosforia, kaliumia, kalsiumia ja magnesiumia.

Pyrolysoinnin etuna kompostointiin ja mädätykseen verrattuna on prosessin nopeus, keston ollessa tavanomaisesti minuuteista tunteihin tai muutamiin päiviin. Haittapuolena on syötteen typen menetys osittain tai kokonaan. Kasveille käyttökelpoinen liukoinen typpi käytännössä menetetään, ellei osaa siitä oteta kuivausvaiheessa talteen. Fosfori ja muut epäorgaaniset suolat säilyvät, mutta etenkin fosfori voi muuttua kasvien kannalta epäedullisempaan muotoon (LUKE 2018). Pyrolyysi tuhoaa tehokkaasti patogeenit (Yacob ym. 2018) ja prosessilla on mahdollista tuottaa energiaa, mutta sen energiatehokkuus riippuu suuresti syötteen kuiva-ainepitoisuudesta. Mitä märempää syöte on, sitä vähemmän energiaa

saadaan tuotettua. Uloste vastaa kuiva-ainepitoisuudeltaan (25 %) jätevedenpuhdistamoiden kuivattua lietettä ja sen lämpöarvo (4 115 kcal/kg) on samalla tasolla kuin karjanlannalla (4 211 kcal/kg). Yhtenä prosessien haittapuolena voi olla syötteen rikin haihtuminen rikkivetynä. Ulosteen rikkipitoisuudet ovat yleensä alhaisia, mutta virtsalla korkeammat (Liu ym. 2014).

Bill & Melinda Gates -säätiö on rahoittanut lukuisia projekteja teemalla ”Reinvent the Toilet” (Bill & Melinda Gates Foundation 2019). Joissakin on hyödynnetty pyrolyysiä ulostejätteiden käsittelemiseen, esimerkkinä aurinkoenergiaa hyödyntävä pyrolyysiprosessi käymäläjätösten käsittelyyn (Humphreys 2014, Mahoney ym. 2014).

Ward ym. (2014) ovat tutkineet ihmisulosteesta valmistettujen polttoainebrikettien ominaisuuksia ja havainneet, että alhaisemmassa (300 °C) pyrolysointilämpötilassa saatiin lämpöarvoltaan puubiohiiltä vastaavia polttoainebrikettejä, kun taas korkeammassa lämpötilassa (750 °C) lämpöarvo oli puolta pienempi.

Pyrolyysin lopputuotteena saatavalla biohiilellä on lukuisia hyödyllisiä ominaisuuksia. Sen huokoisuus auttaa sekä veden että ravinteiden pidättämisessä maaperässä. Biohiilen ulkopinta hapettuu suhteellisen nopeasti, jolloin se alkaa pidättää ravinteita. Biohiili on sekä kasvupaikka että ravinnelähde maaperän mikrobeille, mikä edesauttaa ravinteita pidättävää ravinnekiertoa. Biohiili on ympäristön vaikutuksille vastustuskykyistä ja sen hajoamisaika on tuhansia vuosia (Karhu ym. 2011, Atkinson ym. 2010).

Pyrolyysiin perustuvien menetelmien haittapuolena on niiden tarvitsema säätötekniinen tarve eli niiden toiminta kenttäolosuhteissa ilman jatkuvaa tarkkailua on haastavaa.

#### 2.2.4 Torrefiointi

Torrefiointi eli paahtaminen tai mieto pyrolyysi on hapeton lämpökäsittelymenetelmä, jossa biomassasta häviää hieman massaa mutta suhteessa vähemmän lämpöarvoa, jolloin lämpöarvo painoyksikköä kohden kasvaa (noin 30 %). Torrefiointi tapahtuu lämpötilassa 220 °C – 300 °C. Torrefioinnilla pyritään parantamaan sekä energiasisältöä massayksikköä kohden, että säilyvyysominaisuuksia. Mikäli torrefioitua materiaalia ei pelletöidä, tai muutoin tiivistetä, sen energiasisältö tilavuusyksikköä kohden ei juuri muutu tai se heikkenee. Torrefioinnissa biomassasta poistuu vettä sekä osa haihtuvista aineista. Arvioidaan, että muovien ja orgaanisten haitta-aineiden poisto on puutteellista. Myös raskasmetallit sitoutuvat hiileen (Nissinen 2019).

Kuivaukseen verrattuna tavoitteena on poistaa myös kemiallisesti sitoutunutta vettä ja samalla poistuu myös muita happea sisältäviä yhdisteitä kuten metanolia ja jäljelle jäänyt kiinteä aines muuttuu vettä hylkiväksi. Haihtuvien yhdisteiden määrä kasvaa torrefioinnin lämpötilan ja viipymääjan kasvaessa ja on tyypillisesti 10 – 30 %. Raaka-aineen kuivasta massasta jää kiinteään muotoon n. 70 % ja se sisältää 90 % lähtöaineen lämpöarvosta. Biomassa kuivuu täydellisesti torrefioinnin aikana ja sen jälkeen kosteuden imeytyminen tuotteeseen on hyvin vähäistä. Pelletin tilavuuspohjainen lämpöarvo vastaa kivihiiltä ja se käyttäytyy hiilimyllyjen jauhatuksessa ja pölypolttimilla kuten kivihiili, joten se soveltuu hiililaitoksiin sellaisenaan ilman suurempia muutostarpeita tai investointeja (Kujala 2012, Laitinen 2015, Föhr ym. 2015).

Ihmisulosteen käsittelyyn torrefiointia on käytetty avaruusaluksissa (mm. ulosteen sterilisointiin ja veden tuottamiseen talteenottamalla prosessissa muodostuvaa höyryä). NASA on voinut hyödyntää lopputuotteena syntyvää hiilituotetta erilaisissa sovelluskohteissa avaruudessa, kuten aktiivihiilen tuottamiseen, ravinnerikkaana kasvualustana, rakennusmateriaalina, säteilyltä turvautumiseen ja alkua-ainehiilen, -vedyn ja -hapon sekä polttoainekaasujen lähteenä (Serio ym. 2016, Serio ym. 2015). Torrefioinnin tavoitteena on useimmiten ensisijaisesti kuitenkin syötteen lämpöarvon parantaminen, eikä niinkään ravinteiden talteenotto tai muut sovelluskohteet. Prosessi myös kuluttaa enemmän energiaa kuin tuottaa.



## 2.2.5 Märkähiilto (HTC)

Nestepyrolyysi tai märkähiilto (Hydrothermal carbonization, HTC) on lämpökemiallinen prosessi, jossa märkää biomassaa lämmitetään korkeassa paineessa (20 – 35 bar) tyypillisesti 180 – 250 °C lämpötilassa minuuteista useisiin tunteihin. Syöte voi olla märkää, kuiva-ainepitoisuudeltaan noin 8 – 15 %. Lopputuotteina syntyy jopa 80 % kiinteää hiiltä, jolla on korkea lämpöarvo. Lisäksi muodostuu ravinnerikasta nestejaetta (5 – 20 %) ja vähän kaasua.

Nestepyrolyysin suurin etu on sen kyky käsitellä kosteita syöttömateriaaleja suoraan, ilman aikaa vievää ja energiaa tuhlaavaa kuivatusvaihetta. Esimerkiksi jätevesilietteet ja ihmisten ulosteet ovat sellaisenaan käsiteltävissä ilman kuivausta. Nestepyrolyysillä syöttömateriaalin kosteus on usein 75 - 90 % tai enemmänkin. Muita etuja ovat suhteellisen lyhyt käsittelyaika, kyky poistaa tehokkaasti haitta-aineita ja taudinaiheuttajia sekä prosessin energiatehokkuus. (Libra ym. 2011, Strand 2011, Spitzer ym. 2018).

Haittapuolena voi olla jatkuvatoimisiin prosesseihin liittyvät vaikeudet, etenkin syötteen kuljettamisessa painetta vasten reaktoriin. Lisäksi lopputuote on prosessista poistuessaan märkää ja se pitää käytötarkoituksesta riippuen kuivata, mikä kuluttaa paljon energiaa. Orgaanisista haitta-aineista ja lääkeaineista poistuu vain osa, muovien poisto on puutteellista. Raskasmetallit sitoutuvat hiileen. (Nissinen 2019)

Ihmisulostetta nestepyrolyysin syötteenä on tutkittu varsin vähän ja suurimmassa osassa syötteinä ovat olleet jätevesilietteet. Spitzer ym. (2018) tutkivat nestepyrolyysiä ulosteen käsittelyyn eri lämpötiloilla (180, 210, 240 °C) ja käsittelyajoilla (30, 60, 120 min). Lopputuotteina saatiin korkean lämpöarvon (24,7 – 27,6 MJ/kg) omaavaa hiiltä sekä nestejaetta, joka sisälsi runsaasti typpeä (8,7 g N/kg). Afolabin ym. (2017) tutkimuksessa käsiteltiin ulostetta ja siitä tuotettiin hajutonta, korkean lämpöarvon omaavaa lopputuotetta vastaten lähinnä kehitysmaiden sanitaatio-ongelmaan. Myös muissa tutkimuksissa on todettu, että menetelmällä liete tai uloste voidaan muuttaa haitattomaan muotoon ja samalla saada energiariikkaita lopputuotteita (Xu & Jiang 2017, Liu ym. 2019, Fakkaew ym. 2018).

## 2.3 Yhteenveto

Virtsan käsittelyä ja prosessointia on tutkittu jo vuosikymmeniä ja osa menetelmistä, kuten struviitin saostus, hallitaan jo hyvin. Osa menetelmistä on vielä laboratorioasteella. Tiedetyt menetelmät, kuten biologinen nitrifikaatio yhdistettynä haihdutukseen, on erinomaisesti toimiva ravinteiden talteenottomenetelmä, muttei sovellu pienen yksikön kenttäratkaisuksi. Struviitin saostus on kenttäolosuhteisiinkin sovellettavissa oleva menetelmä, mutta typen talteenottoon se ei sovellu. Käymäläyksikköä ajatellen haasteeksi muodostuu rejektinesteen eli prosessissa muodostuvan sivuvirran käsittely.

Ulosteen käsittelymenetelmien tavoitteena on joko tuottaa ravinnerikkaita, humuspitoisia maanparannusaineita tai energiaa ja/tai lämpöarvoltaan syötettä parempia polttoaineita. Etenkin termiset menetelmät tähtäävät ensisijaisesti jälkimmäiseen, ravinteiden talteenoton ollessa toissijaisista.

MORTTI-hankkeen tarkoituksiin menetelmistä arvioitiin soveltuvan parhaiten virtsan haihdutukseen ja kalvosuodattukseen perustuvat menetelmät. Näiden menetelmien puutteena on pilot-mittakaavan kokemusten puute. Toisaalta valmista ratkaisua ei ole olemassa.

Menetelmävertailun perusteella puolustusvoimien harjoitusalueella pilotoitavaksi virtsan käsittelymenetelmäksi valikoitui SLU:n kehittämä alkalinen haihdutusmenetelmä, koska se arvioitiin tarjolla olevista menetelmistä parhaiten kenttäkäyttöön soveltuvaksi. Ulosteen käsittelymenetelmäksi valittiin tavanomainen kompostointi, koska uudemmat menetelmät, mm. torrefiointi, kaasutus, pyrolyysi, vaativat tekniikkoina enemmän ylläpitoa ja valvontaa, eivätkä näin ollen soveltuneet sellaisenaan kenttäolosuhteisiin.

## 3 Kokeilut

### 3.1 Virtsan käsittelypilotti Säkylässä

#### 3.1.1 Alkukartoitus

Hankkeen tärkein tavoite oli testata kenttäkäyttöön soveltuvaa virtsan ja/tai ulosteen käsittelymenetelmää puolustusvoimien harjoitusalueella. Sopivan alueen löytämiseksi tehtiin kohdekäynnit ennakkotietojen perusteella valituille harjoitusalueille. Alueet pisteytettiin laaditun mallin mukaan ja pisteytyksen lisäksi arviointiin vaikuttivat myös alueiden henkilöstön kiinnostus ja halukkuus osallistua hankkeeseen.

Lähtötilanteen kartoitukseen valittiin neljä harjoitusaluetta, jotka voisivat soveltua hankkeen koe-toiminnalle. Näiden alueiden nykyiset käymäläjäjestelyt ja käymäläjätteen käsittelymenetelmät selvitetiin, jotta voitiin arvioida niiden hyödyntämismahdollisuudet pilotoinnissa. Valintaan vaikuttavia kriteereitä tunnistettiin seitsemän (taulukko 2).

Arvioinnin lopputuloksena pilotointikohteeksi valikoitui Porin prikaatin Säkylän varuskunnassa sijaitseva harjoitusalue. Perusteluina valinnalle olivat sijainti kohtuullisen matkan päässä pilotoinnin käytännön toteuttajiin nähden, sähkön saatavuus, huollon järjestäminen PHRAKL:n avustamana ja pilotin tarpeisiin riittävän iso arvioitu käyttäjämäärä. Lisäksi harjoitusalueelle kulku oli mahdollista ilman erityisiä turvajärjestelyitä.

Taulukko 2. Harjoitusalueen valintaan vaikuttavat kriteerit pilotointia varten.

Arviointikriteeri	Edellytykset	Arviointiasteikko
Jätejakeiden laatu	Pilotointiin tarvittiin sekä virtsaa että kiinteää käymäläjätettä ja valittavan alueen tuli olla sellainen missä syntyy molempia jakeita. Riskinä tunnistettiin harjoitusalueen metsäisyys, jolloin virtsan keräily voi olla hankalampaa. Taajama-alueella käymäläkäyttäytyminen on erilaista ja oletettavasti tasaisempaa.	5=jätejakeiden tasapainoinen keräily onnistuu hyvin, 1=jätejakeiden laatu ei vastaa tavoitetta
Käyttäjämäärä	Pilotoinnilla ei ollut tarkoitus käsitellä koko harjoitusalueen käymäläjätteitä, mutta jätettä täytyi olla riittäviä määriä koetoiminnan onnistumiseksi.	5=jätettä muodostuu riittävästi, 1=käyttäjämäärä on liian pieni
Käyttöaste	Onko käyttäjiä koko ajan vai osan vuotta. Käyttöasteen tuli olla tasainen, jotta raaka-ainetta on saatavilla koko ajan.	5=jätettä muodostuu koko ajan tasaisesti, 1=käyttäjämäärä vaihtelee merkittävästi
Maantieteellinen sijainti	Maantieteellinen sijainti liittyi hankkeen seurantaan. Näytteenotto ja seurantamatkat muodostuvat liian raskaiksi ja kalliiksi, mikäli sijainti on vaikeiden kulkuyhteyksien takana tai liian kaukana.	5=alueelle on hyvät kulkuyhteydet, 1=sijainti on vaikea tai kaukana
Käytettävissä oleva huoltoapu	Pilotointiin tarvittaisiin PHRAKL:n teknistä tukea. Alueen olisi hyvä olla sellainen, jossa olisi käytettävissä huoltohenkilökuntaa koko ajan/ tietyllä viiveellä.	5=alueella on käytettävissä huoltohenkilökuntaa, 1=huollon järjestäminen on vaikeaa
Laitteiston sijoitus alueella	Pilot-laitteistolle tulisi olla esitettävissä sijoituspaikka, johon on ajoyhteys. Sijainti tulisi olla sellainen, ettei se häiritse harjoitusalueen muuta käyttöä tai mahdollisista hajupäästöistä ei ole haittaa. Sijainti tulisi olla mielellään lähellä muita käymälärakennuksia.	5=alueella on tunnistettavissa soveltuva sijoituspaikka, 1=hyvää sijoituspaikkaa ei ole
Sähkön saatavuus alueella	Pilotointi edellytti sähköä ja laitteistolle tuli löytää sellainen paikka, jossa sähköliittymä on mahdollinen.	5=sijoituspaikalle on mahdollista saada sähkökaapelointi, 1=sähkön saaminen on vaikeaa

### 3.1.2 MORTTI -kenttäkäymälän kuvaus

MORTTI-hanke kartoitti kaksi erilaista siirrettävää käymälävaunuvaihtoehtoa, jotka olivat tuotenimeltä Biomaja käymälän vuokraaminen ja Puolustusvoimien omien trailerikäymälöiden kunnostus Taipalsaaressa. Näistä ensin mainittu valikoitui kuljetettavuuden ja muokattavuuden takia hankkeen pilottikäymälävaunuksi. Hankkeessa toteutetun (kappale 2) menetelmävertailun pohjalta virtsan käsittelymenetelmäksi valittiin SLU:n kehittämä alkalinen haihdutusmenetelmä johtuen mm. vähäisestä huoltotarpeesta ja soveltuvuudesta kenttäkäyttöön (mm. Simha ym. 2016, Simha ym. 2018b).

Ulosteen käsittelyyn valittiin tavanomainen kompostointi, koska menetelmävertailun tuloksena kehittyneempien menetelmien, mm. pyrolyysin, pikakompostoinnin, kaasutuksen ja märkähillon, arvioitiin olevan vielä liian kypsymättömiä tekniikoita kenttäolosuhteissa pilotoitaviksi. Kiinteän käymäläjätteen käsittelyä varten päätettiin kuitenkin toteuttaa laboratoriomittakaavan pyrolysointilaitteisto, jolla tehdyt kokeet esitetään luvussa 3.3. Kaikissa pilotoinnin käytännön järjestelyissä tehtiin tiivistä yhteistyötä Säkylässä Porin prikaatin (PORPR) henkilöstön sekä Puolustusvoimien 2. Logistiikkarykmentin (2LOGR) ja Puolustusvoimien rakennuslaitoksen (PHRAKL) kanssa.

Käymälävaunu varustettiin vedettömällä urinaalilla ja virtsan erottelevalla käymäläistuimella, joista kerätty virtsa johdettiin erilliseen virtsan käsittely-yksikköön. SLU:n tutkijat rakensivat ja asensivat käymälävaunuun sopivan käsittely-yksikön, jossa virtsan ravinteet sidottiin tuhka-kalkkiseokseen ja neste haihdutettiin pois lämpöpuhaltimien avulla. Virtsan käsittely-yksikkö käsitti kolme sarjaan kytkettyä tuhka-kalkkiseosta sisältävää laatikkoa, joissa kussakin oli kaksi 700/1200 W lämpöpuhallinta. Pilotin tavoitteena oli testata menetelmän toimivuutta laboratoriomittakaavaa isommassa kokoluokassa, joten energiankulutuksen optimoiminen ei ollut tässä vaiheessa ensisijaista.

Alkalisessa haihdutusmenetelmässä tuore, istuimesta ja urinaalista tullut, virtsa johdettiin tuhka-kalkkipedille, jossa sen pH nousi yli kymmeneen. Tällöin virtsan tyyppi pysyi ureamuodossa, eikä haihtunut. Tuhka-kalkkiseos absorboi myös hyvin tehokkaasti muut virtsan ravinteet ja yhdisteet, jolloin vesi voitiin haihduttaa pois lämpöpuhaltimien avulla. Tuhka-kalkkiseoksessa käytettiin maatilan puupellettivoimalaitoksesta peräisin olevaa puutuhkaa (Vinnerås 2019, Simha ym. 2018b).

Laitteiston mitoitus ja mm. näytteenottoihin liittyvät yksityiskohdat sovittiin yhteistyössä hanketoimijoiden ja SLU:n kesken. Kenttäkäymälä mitoitettiin tulevalle virtsaamalle 30 litraa virtsaa päivässä (eli 900 l/kk). Tämän virtsamäärän käsittelyyn tarvittavan tuhka-kalkkiseoksen määrä oli yhteensä 24 kg (eli 1 kg/37,5 litraa käsiteltävää virtsaa kohden). Tuhka-kalkkiseoksen vaihtoväliksi arvioitiin yksi kuukausi, jonka jälkeen tuhka-kalkkiseoksen oletettiin olevan kyllästynyt virtsasta, eikä sen enää oletettu pystyvän nostamaan virtsan pH:ta riittävän korkealle estämään urean haihtumista. Käytetty kalkki oli kalsiumhydroksidia eli sammutettua kalkkia ja sen määrä suhteessa tuhkaan oli 1:4. Kuvassa 2 on esitetty menetelmä ja sillä tuotettua valmista lopputuotetta.



Kuva 2. Virtsan alkalinen haihdutusmenetelmä käytännössä ja sillä saatu jauhemainen lopputuote. (© SLU)

Hanketoimijat allekirjoittivat salassapitositoumuksen patenttivaiheessa olevan tekniikan tarkempiin yksityiskohtiin liittyen, joten tässä raportissa järjestelyt kuvataan vain pääpiirteittäin. Karlssonin opinnäytetyössä (2019) on esitetty tarkempi kuvaus tekniikasta ja kenttäkäymälän yksityiskohdista. Kuvassa



3 on yleiskuva käymälän sisältä, käymälävaunun sisällä sijainnut virtsan erotteleva istuin, sekä vasemmalla sijainneen urinaalin alla sijainnut virtsan käsittelyjärjestelmä.



Kuva 3. Yleiskuva käymälävaunun sisältä, virtsan erotteleva käymäläistuvin sekä virtsan käsittelyjärjestelmä (rakennusvaiheessa ja koottuna). (© MORTTI-hanke)

### 3.1.3 MORTTI -kenttäkäymälän käyttö, huolto ja näytteenotto

Käymälävaunu oli käytössä Porin Prikaatin Camp Maurin harjoitusalueella Säkylässä 4.3. – 7.6.2019 välisenä aikana. Tuona aikana alue oli varattu harjoituskäyttöön kaikkiaan 46 päivänä ja siellä liikkui arviolta n. 50 – 150 ihmistä päivittäin. Käymälävaunun siivouksesta vastasi PHRAKL ja itse käsittelyjärjestelmän tarkistuksesta, huollosta ja näytteenotosta SLU ja TAMK. Käymälän kiinteät jätökset tyhjennettiin kompostiin ja osa otettiin tutkimuskäyttöön TAMKille pyrolysointia varten (ks. 3.3).

Pilotin toteuttajat (SLU ja TAMK) kävivät tarkistamassa virtsan käsittelyjärjestelmän tilanteen ja tekemässä tarvittavia huolto- ja muutostoimenpiteitä kolme kertaa pilottijakson aikana: 8. – 9.4., 25.4. ja 16.5.2019. Virtsan käsittelyjärjestelmän tuhka-kalkkiseos vaihdettiin pilottiaikana kaksi kertaa ja tarvittaessa haihdutusta säädettiin pienemmälle vähemmän käytön vuoksi ja tehtiin muita tarvittavia muutoksia ja huoltotoimenpiteitä. Käyntikerroilla tehtiin myös käyttäjähaastatteluita, jotka järjestettiin sellaiseen ajankohtaan, jolloin alueella oli ennakkotietojen mukaan harjoituksia käynnissä ja siten potentiaalisia käyttäjiä paikalla.

Pilottitoteutuksen aikana vaunun kunto tarkistettiin PHRAKL:n henkilöstön toimesta yhteensä 25 kertaa ja siivottiin viikoittain. Pilotin aikana havaittuja ongelmia olivat mm. vaunun kuumuus silloin, kun puhaltimet toimivat täysillä. Koska käyttäjiä oli ennakoarvioita vähemmän, kaikkia puhaltimia ei tarvinnut pitää koko ajan päällä ja vaunun lämmityspatteri kytkettiin pois päältä, jolloin lämpötilakin sisällä laski. Lisäksi kuumuus aiheutti hajuongelmia, joita em. toimenpide ja ilmanvaihdon tehostaminen myös vähensivät. Huhtikuun lopulla käymäläistuimen rengas rikkoontui ja se korjattiin liimaamalla. Vaunuun tuli jonkin verran sotkua myös käymäläistuimeen laitettavan seosaineen levittyä istuimen reunoille ja lattialle. Nämä korjattiin viikkosiivousten yhteydessä. Hanketoimijoiden tarkistuskäynneillä käymäläistuimeen kertyneet uloste, paperi ja seosaine tyhjennettiin kompostoriin.

Tuoreesta virtsasta, lopputuotteesta eli tuhka-kalkkiseoksesta, johon virtsan ravinteet oli imeytetty sekä tuhka-kalkkiseoksesta ennen virtsan imeytystä (taustanäyte) otettiin näytteitä ravinteiden, mikrobiologisen laadun sekä lääke- ja haitta-aineiden analysointia varten. Näytteistä määritettiin pääravinteiden, typen, fosforin ja kaliumin pitoisuudet, muiden hivenaineiden ja haitallisten metallien, suolojen, kuten kloridin, sulfaatin ja fluoridin pitoisuudet, mikrobiologinen laatu eli *E. coli* ja *Salmonellan* esiintyminen lannoitevalmisteita koskevan asetuksen mukaisesti (Maa- ja metsätalousministeriö 2011) sekä yhteensä yli 300 lääke- ja haitta-ainetta.

Virtsanäytteet otettiin 8.5.2019, jolloin virtsa ohjattiin keräysjärjestelmästä käsittely-yksikön ohi erilliskeräykseen. Lopputuotenäytteet otettiin tuhka-kalkkiseoksen vaihdon yhteydessä 8.4., 8.5. ja 7.6.2019. Viimeinen näytteen keräysjakso 8.5. – 7.6.2019 toteutettiin siten, että urinaalista ja käymäläistuimesta virtsa johdettiin erikseen, jolloin niistä saatiin omat näytteet. Lääke- ja haitta-aineanalyysit otettiin vain 8.5. otetusta lopputuotenäytteestä.

### 3.1.4 MORTTI -kenttäkäymäläpilotin tulokset ja niiden arviointi

#### 3.1.4.1 Kenttäkäymälän kuormitus ja lopputuotteen ravinnemäärät

Kenttäkäymälän käyttäjämääriä oli vaikea arvioida, sillä vaunun oveen asennettu kävijälaskuri ei antanut luotettavaa tulosta. Laskuriin tallentuivat myös huolto- ja tarkistuskäynnit sekä pisuaarin edessä seisonut henkilö, ts. sama henkilö useampaan kertaan. Ennakoarvioiden mukaan käyttäjiä alueella olisi ollut 50 – 150 päivittäin, joista kaikkien ei kuitenkaan oletettu käyvän kyseisessä käymälässä. Käymälävaunun kävijälaskurin mukaan käyttäjiä olisi ollut n. 30 – 40/alueen harjoituspäivä eli yhteensä n. 1400 – 1800 pilotin testiaikana, mutta todellinen käyttäjämäärä jäi alhaisemmaksi ja käyttö oli epäsäännöllistä.

Myös SLU:n tekemien laskelmien ja massataseiden perusteella käymälän käyttö jäi huomattavasti odotettua alhaisemmaksi ja käsitelty virtsamäärä oli vain noin 100 – 150 litraa kuukaudessa eli alle kuudesosan mitoitetusta (900 l/kk). Tästä johtuen laitteiston virtsan haihdutus oli liian tehokas toteutune-

seen virtaamaan nähden, mikä aiheutti tuhka-kalkkiseoksen liiallista kuivumista ja ajoittain korkean lämpötilan sekä käsittely-yksikön että käymälävaunun sisällä. Liian korkea lämpötila puolestaan vaikutti typen talteenottoon, joka jäi laskelmien mukaan varsin alhaiseksi ollen vain noin 20 %. Kantoaineen liiallinen kuivuminen aiheutti myös tuhka-kalkkiseoksen paakkuuntumista, jonka johdosta tuhka-kalkkiseos piti vaihtaa kuukausittain, vaikka se ei ollutkaan vielä muutoin menettänyt kykyään nostaa virtsan pH:ta riittävän korkeaksi.

Koska käymälän kuormitus jäi odotettua alhaisemmaksi, lopputuotteen analyysitulokset eivät anna täysin oikeaa kuvaa menetelmällä tuotettavan lopputuotteen ominaisuuksista. Alkalisella haihdutusmenetelmällä olisi ollut potentiaalisesti mahdollista ottaa talteen 6,9 g N/l ja 0,64 g P/l käsiteltyä virtsaa eli lopputuotteena syntyvä tuhka-kalkkiseos, johon virtsa imeytettiin, olisi tällöin sisältänyt 26 % typpeä (260 g N/kg ka) ja 2,4 % fosforia (24 g P/kg ka). Etenkin typen osalta jäätiin kauas tavoitteesta ja lopputuotteen sisältämät ravinnemäärät olivat vain noin 0,5 – 1,9 % typpeä ja 0,9 – 1,1 g % fosforia.

#### 3.1.4.2 Näytteet tuoreesta virtsasta

Virtsanäytteiden ravinteiden, suolojen ja mikrobiologisten analyysien tulokset on esitetty taulukossa 3. Esitetyt tulokset on laskettu kahden rinnakkaisnäytteen keskiarvona. Pääravinteiden, typen, fosforin ja kaliumin, kokonaispitoisuudet olivat analysoiduissa virtsanäytteissä varsin korkeat 8600, 640 ja 1400 mg/l vastaavasti. Viskarin ym. (2018) tutkimuksessa käytetty virtsa oli kerätty festivaaleilta ja tapahtumista, jolloin on luonnollista, että se oli lähtökohtaisesti laimeampaa. Suolojen, kuten kloridin ja sulfatien pitoisuudet olivat samaa suuruusluokkaa aiempiin tutkimuksiin verrattuna. Sen sijaan natriumin pitoisuus oli selvästi korkeampi käymälävaunusta kerätyssä virtsassa kuin tapahtumista kerätyssä virtsassa (Viskari ym. 2018).

Virtsanäytteistä ei löytynyt lainkaan *E.colia* tai *Salmonellaa*, joten mikrobiologiselta laadultaan virtsa täytti lannoitevalmisteita koskevan asetuksen vaatimukset (Maa- ja metsätalousministeriö 2011). Haitallisten metallien pitoisuudet olivat pääosin samaa suuruusluokkaa, kuin aiemmissa tutkimuksissa on todettu, mutta osittain hieman korkeammat. Ne eivät kuitenkaan ylittäneet lannoitevalmisteasetuksen raja-arvoja kuiva-ainepitoisuutta kohti laskettuna (Viskari ym. 2018).

Taulukko 3. Virtsanäytteiden ravinteiden, suolojen, alkuaineiden ja mikrobiologisten analyysien tulokset

Määrittys	Käsitlemätön virtsa (mg/l)
Kokonaistyyppi	8 600
Liukoinen tyyppi	8 533
Nitraatti- ja nitriittitypen summa	0,27
Kokonaisfosfori	637
Liukoinen fosfori (0,45 µm)	607
Kalium	1 467
Kloridi	3 967
Sulfaatti	1 200
Fluoridi	61
Arseeni	19
Boori	0,653
Kadmium	0,31
Kalsium	96
Koboltti	0,46
Kromi	0,008
Kupari	0,025
Lyijy	0,56
Magnesium	62
Mangaani	0,021
Molybdeeni	0,05
Natrium	2 533
Nikkeli	2,73
Rauta	0,087
Seleen	0,04
Sinkki	0,303
<i>E. coli</i>	<10
<i>Salmonella</i>	Ei todettu

Virtsanäytteistä analysoitiin 126 eri lääkeainetta, kahdeksan hormonia ja 201 eri orgaanista haitta-ainetta, kuten kloorifenoleita, muita fenolisia yhdisteitä, alkyylifenoleita ja etoksylaatteja sekä torjunta-aineita, ftalaatteja ja perfluorattuja yhdisteitä (taulukko 4).

Virtsanäytteistä löydettiin kaikkiaan yhdeksää eri lääkeainetta ja neljää eri hormonia. Löydettyjen lääkeaineiden kirjo oli selvästi pienempi kuin aiemmissa tutkimuksissa on havaittu. Tätä selittää hankkeessa tehty ennakko-oletus, että nuoret varusmiespalvelusta suorittavat henkilöt, joita pääsääntöisesti käymälän käyttäjäkunnassa oli, ovat suhteellisen terveitä ja tarvitsevat vähemmän lääkitystä. Virtsasta löydettyjä lääkeaineita olivat mm. tulehduskipu- ja särkylääkkeet (ibuprofeeni, naprokseeni ja parasetamoli) sekä antihistamiini, setiritsiini, antibiootti tetrasykliini, ihottuman hoidossa yleisesti käytetty tulehdusta vähentävä hydrokortisoni, sekä nenän limakalvojen turvotuksen hoitoon tarkoitettu ksylometatsoliini (esim. Nasolin, Otrivin suihkeissa). Lisäksi virtsassa oli kofeiinia.

Taulukko 4. Virtsasta ja lopputuotteesta otettujen näytteiden lääkeaine-, hormoni- ja muiden relevanttien haitta-aineanalyysien tulokset. Otsikkoriveillä suluissa kokonaismäärä analysoiduista yhdisteistä.

Näyte	Virtsa (mg/l)	Lopputuote (mg/kg ka)
<b>Lääkeaineet (126)</b>		
Bisoprololi		0,007
Hydrokortisoni	0,027	
Ibuprofeeni	0,118	18,5
Kofeiini	3,07	3,1
Ksylometatsoliini	0,006	0,90
Naprokseeni	0,007	0,35
Parasetamoli	0,121	
Setiritsiini	0,004	
Tetrasykliini	0,012	
<b>Hormonit (8)</b>		
Estradioli (17β-Estradioli)	0,001	
Estrioli	0,002	
Estroni	0,001	
Testosteroni	0,004	
<b>Fenoliset yhdisteet (31)</b>		
1,2-dihydroksibentseeni (pyrokatekoli)	1 767	
2-naftoli	0,002	
4-Kloori-2-Metyylifenoli	0,015	
4-Nitrofenoli	1,67	0,20
Fenoli	0,243	
Hydrokinoni	1,01	0,43
Resorsinoli	0,008	
<b>Kloorifenolit (18)</b>		
<b>Ftalaatit (20)</b>		
Di-isobutyyliftalaatti (DiBP)	0,008	
Dibutyyliftalaatti	0,127	
Dietyyliheksyyliftalaatti (DEHP)	0,006	
<b>Alkyylifenolit ja etoksylaatit (12)</b>		
<b>Torjunta-aineet (120)</b>		
Trikloraani	0,001	
<b>Perfluoratut yhdisteet (PFC) (24)</b>		

Orgaanisista haitta-aineryhmistä löydettiin mitattavia määriä seitsemää eri fenoliyhdistettä, kolmea ftalaattia ja yhtä torjunta-ainetta kaikkiaan 201 tutkitusta yhdisteestä. Muita orgaanisia haitta-aineita ei joko ollut tai niiden pitoisuudet virtsassa jäivät alle määritysrajan eli niitä ei käytetyllä analyysimenetelmällä kyetty määrittämään.

Virtsasta löytyneitä fenolisia yhdisteitä olivat pyrokatekoli, 2-naftoli, 4-kloori-2-metyylifenoli, 4-nitrofenoli, fenoli, hydrokinoni ja resorsinoli. Virtsassa esiintyy fenolia ja sen hajoamistuotteina mm pyrokatekolia ja hydrokinonia myös luonnostaan, ravinnon kautta saatavien proteiinien hajoamistuotteina (Työterveyslaitos 2016) ja sen pitoisuudet voivat luonnostaan olla useita kymmeniä mg/l. Lisäksi fenoleille altistuminen ihokontaktin, ravinnon tai hengitysilman kautta lisää fenolin ja sen eri hajoamistuotteiden määrää virtsassa. 2-naftolia käytetään PAH-seoksille altistumisen indikaattorina ja sen esiintyminen indikoi nimenomaan helposti ilmaan rikastuville pienimolekyylisille PAH-yhdisteille altistumista (Työterveyslaitos 2016). 4-kloori-2-metyylifenoli on 4-kloori-2-metyylifenoksietikka-hapon eli MCPA:n hajoamistuote virtsassa. MCPA on kasvinsuojeluaine, jota käytetään rikkakasvien torjuntaan (Työterveyslaitos 2016, OVA 2019). 4-nitrofenoli on nitrobenseenin hajoamistuote virtsassa. Nitro-



bentseeni on teollisuusliuotin, jota käytetään mm. aniliinin ja eräiden muiden kemikaalien valmistuksessa lääke- ja kumiteollisuudessa (KETSU 2002). Virtsassa esiintyi myös resorsinolia, jonka pitoisuuden on todettu nousevan mm. tupakoinnin seurauksena (Porras ym. 2016). Resorsinoli on synteettinen kemikaali, jota käytetään yleisesti teollisuuden prosesseissa, kuten kumiteollisuudessa, puuliimojen valmistuksessa. Lisäksi sitä käytetään esimerkiksi aknen hoitoon tarkoitetuissa lääkevoiteissa ja kosmetiikassa, kuten hiusväreissä ja hapettumisen estoaineena esim. äyriäisissä (Porras ym. 2016). Näin ollen sille altistuminen on varsin yleistä, jolloin sen erittyminen ja esiintyminen virtsassa on mahdollista.

ftalaateista virtsasta löytyi Di-isobutyyliftalaattia (DIBP), dibutyyliftalaattia (DBP) ja dietyyliheksyyliiftalaattia (DEHP), jotka ovat kaikki yleisesti käytettyjä yhdisteitä. Erityisesti DEHP:n esiintymistä on tutkittu, koska sitä pidetään teratogeenisenä ja ns. hormonihäiritsijänä. Ftalaatteja käytetään yleisesti muovin pehmentiminä, teollisuuskemikaaleissa, kuten liuottimissa ja voiteluaineissa, tekstiiliteollisuuden lisäaineina, torjunta-aineissa ja kosmetiikassa, kuten deodoranteissa, hajuvesissä ja hiuslakoissa. Näin ollen altistumme yleisesti ftalaateille käyttämiemme astioiden, ruoan, kosmetiikan ja hengitysilman kautta. Ftalaattien on todetty erittyvän virtsan ja ulosteiden kautta, eivätkä ne ole biokertyviä (Koch ym. 2003, Fredriksen ym. 2007).

Virtsasta analysoiduista torjunta-aineista löytyi ainoastaan triklosaania. Triklosaania käytetään useissa kuluttajatuotteissa, kuten saippuoissa, shampoissa ja desinfiointiaineissa ja on käytetty antibakteerinen ja antifungaalinen aine. (Porras ym. 2015) Triklosaani on myös esimerkiksi aknen hoitoon käytetty antibiootti, mikä osaltaan saattaa selittää sen esiintymistä näytteissä.

Virtsan analyysitulosten ja lääkeainelöydösten perusteella nuoret varusmiehet ovat verrattain terveitä ja heidän käyttämänsä lääkeaineiden kirjo on pieni verrattuna esimerkiksi tapahtumista kerättyyn virtsaan (Viskari ym. 2017). Löydettyjä lääkeaineita olivat tulehdusten, kivun ja flunssan hoitoon liittyviä. Lisäksi ilmeisesti kahvia ja energiajuomia juodaan runsaasti, koska virtsassa oli korkeita kofeiinipitoisuuksia.

### **3.1.4.3 Näytteet lopputuotteesta ja tuhka-kalkkiseoksesta (taustanäyte)**

Lopputuotenäytteiden ja taustanäytteen ravinteiden, suolojen ja mikrobiologisen laadun analyysitulokset on esitetty taulukossa 5. Tuhkassa on lähtökohtaisesti korkea fosfori- ja kaliumpitoisuus, joten virtsan sisältämän kaliumin ja fosforin imeytyminen tuhkaan ei selkeästi lisännyt niiden määrää lopputuotteesta taustanäytteeseen verrattuna. Tulos johtui osittain myös siitä, että pilottikäymälän kuormitus jäi huomattavasti odotettua alhaisemmaksi. Sen sijaan virtsan tyyppi näytti varsin tehokkaasti imeytyvän tuhka-kalkkiseokseen ja nostavan sen tyypipitoisuutta. Myös virtsan sisältämät suolat, ja niitä indikoivat kloridi ja natrium kertyivät tuhkaan tehokkaasti. Sulfaattia sen sijaan on tuhkassa paljon jo lähtökohtaisesti, mikä käy ilmi tuhka-kalkkiseoksen taustapitoisuuden analyysistä (taustanäyte).

Kadmiumia lukuun ottamatta haitallisia metalleja ei tuhkassa ollut lannoitevalmisteita koskevan asetuksen raja-arvoja ylittäviä määriä, eikä niitä virtsan mukana myöskään kertynyt lisää. Kadmiumin pitoisuus tuhkassa sen sijaan oli jo taustamittauksessa korkeampi, kuin mitä maa- ja puutarhataloudessa käytettävien lannoitevalmisteiden on sallittua sisältää. Sen vuoksi tuhka-kalkkiseosta olisi periaatteessa mahdollista käyttää turvallisesti ainoastaan metsälannoituksessa.

Lopputuotteesta löytyi vähemmän lääke- ja haitta-aineita kuin virtsasta (taulukko 4). Lääkeaineiden osalta tuhkasta löytyi mitattavia määriä ibuprofeenia, kofeiinia, ksylometatsoliinia ja naprokseenia sekä yllättäen bisoprololia, jota ei virtsanäytteistä kuitenkaan löytynyt. Lisäksi tuhkaan imeytyi mitattavia määriä virtsastakin löytyneitä 4-nitrofenolia ja hydrokinonia. Löydetty pitoisuudet olivat kuitenkin varsin pieniä.

Tuhkaseos oli matriisina varsin haastava analytiikan kannalta, sillä siitä oli vaikea saada uutettua imeytyneitä yhdisteitä analyysiä varten. Tulosten perusteella näyttäisi kuitenkin siltä, että tuhka-kalkkiseos on vahva absorbentti, johon imeytyneet yhdisteet myös jäävät.

Taulukko 5. Lopputuotenäytteiden ravinteiden, suolojen, alkuaineiden ja mikrobiologisten analyysien tulokset. Taus-  
tanäyte on tuhka-kalkkiseos ilman virtsan imeytystä.

Määrittäminen	Yksikkö	Näyte 8.4.19	Näyte 8.5.19	Näyte/ urinaali 7.6.19	Näyte/ istuin 7.6.2019	Taustanäyte (tuhka-kalkki)	MMM 24/11*
Kuiva-aine	g/kg	948	842	620	713	1 000	
Laboratoriotilavuuspaino	g/l	826	826	1 600	882	815	
Liukoinen sulfaatti	mg/kg ka	7 517	7 492	4 453	5 260	6 109	
Liukoinen kloridi	mg/kg ka	4 992	7 238	4 840	3 237	195	
Liukoinen fluoridi	mg/kg ka	<10	<10	19	5	<0,0001	
Fosfori (P), vesiliukoinen	mg/kg ka	21	76	207	36	Ei todettu	
Fosfori, kokonais	mg/kg ka	9 150	8 550	11 000	10 500	10 000	
Vesiliukoinen typpi (N)	mg/kg ka	3 960	3 313	51 655	5 687	8,1	
Kokonaistyppi (N)	mg/kg ka	5 000	7 000	19 500	7 100	1 100	
Kalium	mg/kg ka	56 000	52 500	68 500	69 500	75 500	
Kalsium	mg/kg ka	220 000	185 000	180 000	200 000	215 000	
Boori	mg/kg ka	195	170	215	235	250	
Magnesium	mg/kg ka	34 500	29 500	37 000	41 500	44 000	
Mangaani	mg/kg ka	10 500	9 300	12 000	13 000	13 500	
Arseeni	mg/kg ka	1	1	1,15	1,3	1,3	25/40
Barium	mg/kg ka	370	320				
Kadmium	mg/kg ka	4	4	5,65	6,1	6,8	2,5/25
Koboltti	mg/kg ka	6	4	4,85	5,7	5,8	
Kromi	mg/kg ka	14	12	12,5	22,5	14,5	300
Kupari	mg/kg ka	103	90	105	120,0	125,0	600/700
Lyijy	mg/kg ka	5	6	8,85	18,5	8,8	100/150
Nikkeli	mg/kg ka	5	4	4,4	5,6	5,4	100/150
Molybdeeni	mg/kg ka	2	2	1,9	2,2	2,2	
Sinkki	mg/kg ka	235	215	275	300	305	1 500/4 500
Natrium	mg/kg ka	5 000	8 000	11 000	6 500	3 550	
Rauta	mg/kg ka	6 000	5 000	6 200	7 550	7 750	
Seleen	mg/kg ka	0	0	0,22	0,21	0,23	
<i>E. coli</i>	pmy/g	<10	<10	<10	<10	<10	<1000/<100 **
<i>Salmonella</i>	/25 g	Ei todettu	Ei todettu	Ei todettu	Ei todettu	Ei todettu	Ei todettu

\*) Haitallisten metallien enimmäispitoisuudet maa- ja puutarhataloudessa/metsälannoituksessa  
 \*\*) "Ammattimaiseen kasvihuoneviljelyyn tarkoitetuissa kasvualustoissa, joissa syötävät kasvinosat ovat suoraan kosketuksissa kasvualustaan"

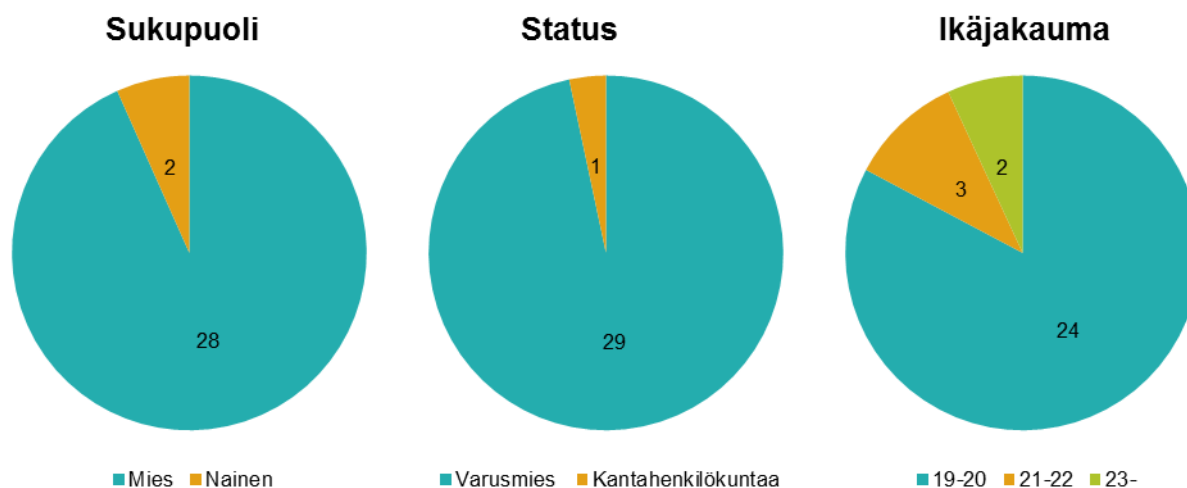
### 3.1.5 Käymälävaunun käyttäjäkokemukset

Käymälävaunun testausaikana tehtiin käyttäjien haastattelututkimusta käymälän käytöstä. Haastattelut tehtiin neljänä eri haastattelukertana 16.4., 8. – 9.5. ja 25.5. Haastattelut pyrittiin järjestämään ajankoh-  
tana, jolloin alueella oli varmasti käyttäjiä paikalla. Haastattelut tehtiin käymälän käytön yhteydessä kasvokkain, mutta nimettöminä. Haastattelukysymykset on esitetty taulukossa 6.

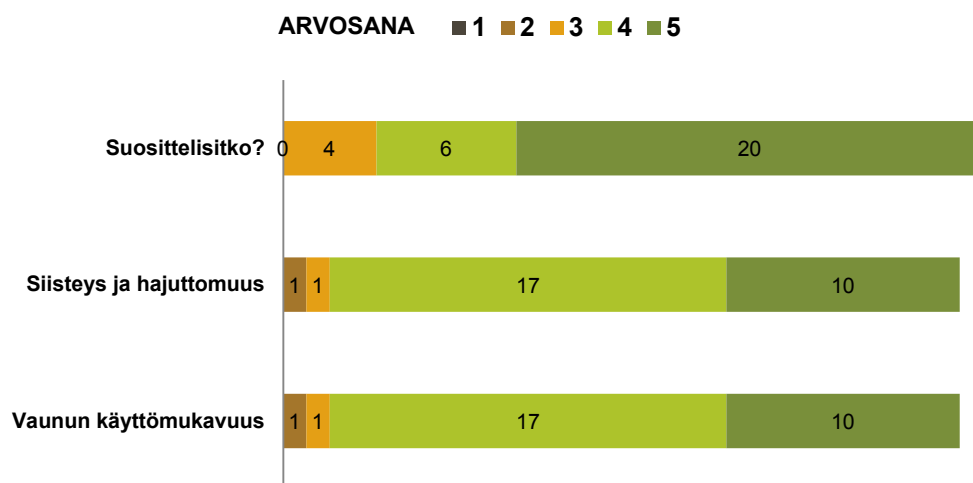
Taulukko 6. Käymälävaunun käyttöä koskevat haastattelukysymykset.

Kysymys	Vaihtoehdot
<b>Taustakysymykset</b>	
Sukupuoli	mies/nainen
Status	Varusmies/Kantahenkilökunta/ Kertausharjoittelija/Siviili
Ikä	
<b>Käymälän käyttöä koskevat kysymykset</b>	
Arvioi asteikolla 1-5 vaunun käyttömukavuutta ja helppoutta	erittäin helppo ja mukava (5) – erittäin vaikea ja epämukava (1)
Arvioi asteikolla 1-5 käymälän siisteyttä ja hajuttomuutta	erittäin siisti ja hajuton (5) – erittäin epäsiisti ja haiseva (1)
Arvioi asteikolla 1-5 suosittelisitko käymälää käyttöön harjoitus- ja kenttäolosuhteissa	suosittelisin (5) – en suosittelisi (1)

Alueella oli käytössä myös vesikäymälät, jotka sijaitsivat tupa-/taukorakennusten välittömässä läheisyydessä. Hankkeen testattava käymälävaunu sijaitsi niihin nähden kauempana, mikä rajoitti käymälän käyttäjämääriä. Myös alueen käyttöaste oli odotettua pienempi. Käyttäjäkyselyihin saatiin neljällä eri haastattelukerralla vastauksia yhteensä 30. Vastanneiden taustatiedot on esitetty kuvassa 4 ja käymälävaunun käyttökokemukset kuvassa 5.



Kuva 4. Käymälän käyttäjäkyselyyn vastanneiden taustatiedot.



Kuva 5. Käymälän käyttäjäkyselyyn vastanneiden arviointi käymälän käyttömukavuudesta, siisteydestä ja hajuttomuudesta sekä suositus käymälävaunun soveltuvuudesta kenttäkäyttöön. Suosittelisin / Erittäin siisti ja hajuton / Erittäin helppo ja mukava (5) – En suosittelisi / Erittäin epäsiisti ja haiseva / Erittäin vaikea ja epämukava (1).

Vastaajista 10 (35 %) oli sitä mieltä, että käymälävaunu oli käyttömukavuudeltaan ja helppoudeltaan erittäin hyvä (arvosana 5), 17 (59 %) antoi arvosanan hyvä (arvosana 4) ja 2 (6 %) antoi arvosanaksi 3 tai vähemmän. Arvosanan 3 antanut vastaaja ilmoitti vapaassa kommentissa, että vaunussa oli erittäin kuuma. Arvosanan 2 antanut vastaaja ilmoitti vapaassa kommentissa, että vaunussa haisi pahalle. Molemmat seikat vaikuttavat vahvasti käyttömukavuuteen. Kyseisellä kerralla vaunun puhallin toimi kesähelteillä virheellisesti täydellä teholla, jolloin vaunun lämpötila oli noussut jopa yli 40 asteen.

Käymälävaunun siisteyttä ja hajuttomuutta koskevaan kysymykseen 17 henkilöä (59 %) vastasi, että vaunu oli hajuton ja siisti (arvosana 4) ja 8 (28 %), että vaunu oli erittäin hajuton ja siisti (arvosana 5). Loput 4 vastaajista (14 %) antoivat arvosanaksi 3 tai vähemmän. Kaksi arvosanan 3 antaneista ilmoitti vaunun olevan kuuma, joka saattoi vaikuttaa hajuhaittojen syntymiseen. Arvosanan 1 antanut ilmoitti, että käymälässä haisi pahalle.

Vastaajista 19 (66 %) suosittelee ehdottomasti käymälävaunua vastaavaan käyttöön (arvosana 5). Kuusi vastaajaa (21 %) suosittelee arvosanan 4 arvoisesti. Loput neljä vastausta (14 %) olivat varauksellisia suosituksessaan (arvosana 3). Yksi arvosanan 3 antaneista arvioi vaunun olevan hieman isokokoinen metsäkäyttöön.

Virtsan käsittelyjärjestelmä tuotti täydellä teholla toimiessaan paljon lämpöä. Vaikka käsittelyyksikkö oli eristetty, se lämmitti vaunua ja ulkoilman lämmitessä keväällä vaunu lämpeni liikaa sisäpuolelta aiheuttaen myös hajuongelmia, minkä myös vaunun huoltoa tehneet panivat merkille. Tällöin korjaustoimenpiteenä puhaltimien tehoa vähennettiin, koska vaunua myös käytettiin vähemmän, kuin mihin järjestelmä oli alun perin mitoitettu. Itse järjestelmän kehittämistä varten tämä ongelma on helppo korjata eristämällä ja/tai muuttamalla prosessia energiatehokkaammaksi, jolloin tarvittava lämpö on lähtökohtaisesti pienempi.

Muita kommentteja tuli satunnaisesti esim. oven lukituksen heikkoudesta, värityksestä, ikkunan sijainnista ja verhottomuudesta. Nämä olivat kaikki asioita, jotka ovat helposti korjattavissa ja ovat enemmänkin kiinni testauksessa käytettävästä vaunusta, eivätkä niinkään itse prosessista johtuvia asioita.

### 3.1.6 MORTTI -kenttäkäymälä verrattuna nykyjärjestelmään

Verrattaessa vaihtoehtoista kenttäolosuhteissa tapahtuvaa virtsan ja ulosteen käsittelyä (alkalinen haihdutus + kompostointi) nykyisin vallitsevaan toimintatapaan, jossa käymäläjätevedet kerätään ja varastoidaan kenttäkäymälässä ja kuljetetaan käsiteltäväksi jätevedenpuhdistamolle, voidaan tunnistaa keskeisiä ympäristö- ja kustannusvaikutuksiin liittyviä tekijöitä. Tehokas ravinteiden kierrätys voi vähentää ilmasto- ja rehevöittäviä vaikutuksia, mutta se edellyttää koko ketjun hyvää hallintaa.

Ympäristövaikutuksia aiheutuu toiminnan eri vaiheista, kuten kuljetuksista, käymäläjätevesien käsittelystä, tarvittavien raaka-aineiden valmistuksesta ja käytöstä sekä lopputuotteiden hyödyntämisestä. Jos lopputuotteiden sisältämien ravinteiden käytöllä voidaan vähentää energiantensiivisesti tuotettujen mineraalilannoitteiden tuotantoa ja käyttöä, voidaan nämä huomioida laskennallisina päästöhyvityksinä. Jätevedenpuhdistamolla syntyvän ylijäämälietteen sisältämille ravinteille voidaan laskea päästöhyvityksiä, jos lietteen käytöllä voidaan vähentää mineraalilannoitteiden käyttöä. Sama koskee kenttäkäsittelyssä muodostuvaa virtsa-tuhka-kalkkiseosta sekä ulostekompostia.

Nykykäytännössä selkeästi suurin ilmastovaikutus aiheutuu käymäläjätevesien kuljetuksesta jätevedenpuhdistamolle. Käymäläjätevesien käsittelystä puhdistamolla aiheutuvat ilmastovaikutukset ovat suuruusluokaltaan alle kymmenesosa kuljetukseen verrattuna. Mitä pidempi matka jätevesiä joudutaan kuljettamaan, sitä suurempi on kuljetuksista aiheutuva vaikutus.

Vaihtoehtoisessa ratkaisussa, jossa virtsa ja uloste käsitellään kentällä, merkittävimmiä tekijöiksi muodostuvat alkalisen haihdutuksen energiankulutus ja ulosteen kompostoinnin typpioksiduuli- ja metaanipäästöt sekä kompostoinnin tukimateriaalina käytetyn turpeen hajoamisesta aiheutuvat päästöt. Alkalinen haihdutus aiheuttaa samaa suuruusluokkaa olevan ilmastovaikutuksen kuin jätevesien kuljetus

noin 40 kilometrin päässä sijaitsevalle puhdistamolle, jos energiankulutuksena käytetään laitteiston uudemmissa versioissa toteutunutta energiankulutusta, joka on noin kymmenesosan verrattuna Säkylässä pilotoituun laitteistoon. Energiankulutusta on saatu laskemaan mm. kierrättämällä energiaa laitteiston sisällä. Alkalisen haihdutusmenetelmän energiankulutuksen optimointi onkin tärkeässä roolissa, jotta se voisi ilmastovaikutuksiltaan kilpailla nykyisen toimintatavan kanssa. Myös ulosteen kompostointi aiheuttaa samaa suuruusluokkaa olevan ilmastovaikutuksen kuin jätevesien kuljetus noin 40 kilometrin päässä sijaitsevalle puhdistamolle. Kompostoinnin ilmastovaikutuksia on mahdollista pienentää vähentämällä turpeen käyttöä kompostoinnin tukiaineena.

Suurin hyöty ilmastovaikutuksissa on mahdollista saavuttaa, jos virtsasta ja ulosteesta tuotettujen lopputuotteiden ravinteilla voidaan vähentää mineraalilannoitteiden tuotantoa ja käyttöä. Tällöin saatavat päästökompensaatiot ovat varovaisimmillakin arvioilla suurempia kuin alkalisen haihdutuksen ja kompostoinnin aiheuttamat kasvihuonekaasupäästöt, jolloin nettoilmastovaikutus jää negatiiviseksi. Nykykäytännössä lietteiden lannoitekäyttöön liittyvä päästökompensatio on huomattavasti pienempi kuin virtsasta ja ulosteesta tuotettujen lannoitetuotteiden. Etenkin talteenotettavan liukoisen typen määrä on jopa kymmenkertainen vaihtoehtoisessa ratkaisussa verrattuna ylijäämälietteen typpimäärään.

Koska molempiin tarkasteltuihin vaihtoehtoihin liittyy monta kokonaisuuteen vaikuttavaa osatekijää, on ilmastovaikutusten suhteen vaikea tehdä lopullista johtopäätöstä siitä, kumpi vaihtoehto on lopulta parempi. Paikalliset olosuhteet (mm. etäisyys puhdistamolle), tekniikoiden energiankulutus sekä lopputuotteiden käyttö mineraalilannoitteiden korvaajina vaikuttavat olennaisesti vaihtoehtojen paremmuusjärjestykseen. Tästä syystä tarkempi arviointi tulisi tehdä aina tapauskohtaisesti.

Nykykäytäntöön liittyviä kustannuksia ovat jätevesien kuljetus puhdistamolle sekä puhdistamon perimä käsittelymaksu. Kuljetuskustannukset ovat suuruusluokaltaan n. 10 €/m<sup>3</sup> ja käsittelymaksu vaihtelee välillä 50 – 100 €/m<sup>3</sup> (HSY 2019, Jätehuolto Askonen 2019 (suullinen tiedonanto)). Kenttäkäsittelyn osalta kustannukset muodostuvat alkalisen haihdutuksen sähkönkulutuksesta (alle 10 €/m<sup>3</sup>), sammuteutusta kalkista (n. 4 €/m<sup>3</sup>) sekä kompostoinnin kuivikkeesta (n. 15 €/m<sup>3</sup>). Näiden lisäksi kentällä tapahtuvien käsittelymenetelmien ylläpitoon tarvittavalle työlle pitää laskea joku hinta ja merkittäväksi tekijäksi muodostuu lopulta se, kuinka automatisoidusti alkalinen haihdutusmenetelmä ja kompostointi voidaan toteuttaa. Lopputulokseen vaikuttaa myös se, voidaanko tuotettaville kierrätyslannoitteille laskea hintaa.

Taulukko 7. Nykyinen käymäläjätevesien käsittely verrattuna vaihtoehtoiseen käymäläjätevesijakeet erottelevaan käytäntöön.

	Käymäläjätevedet kerätään kenttä-käymälään ja kuljetetaan jätevedenpuhdistamolle käsiteltäviksi	Virtsan ja ulosteen erottelu kenttä-käymälässä ja jakeiden käsittely erikseen kentällä
Kerättävät jakeet	Käymäläjätevedet	Virtsa ja uloste erikseen
Käsittely kentällä	Ei käsittelyä, pelkkä varastointi	Virtsan alkalinen haihdutus Ulosteen kompostointi
Kuljetus jätevedenpuhdistamolle	Käymäläjätevedet	Ei kuljetusta
Lopputuotteet, joilla voidaan korvata mineraalilannoitteita	Ylijäämälietteen N <sub>liuk</sub> ja P (60 % ympäristökorvausjärjestelmän mukaisesti)	Virtsa-tuhka-kalkkiseoksen N <sub>liuk</sub> ja P Ulostekompostin N <sub>liuk</sub> ja P
Lopputuotteiden kuljetus ja hyödyntäminen	Kuljetusetäisyys ? Maanparannusaine	Kuljetusetäisyys ? Maanparannusaine / lannoitevalmiste

## 3.2 Virtsan ultrasuodatus ja käänteisosmoosi -koeajo

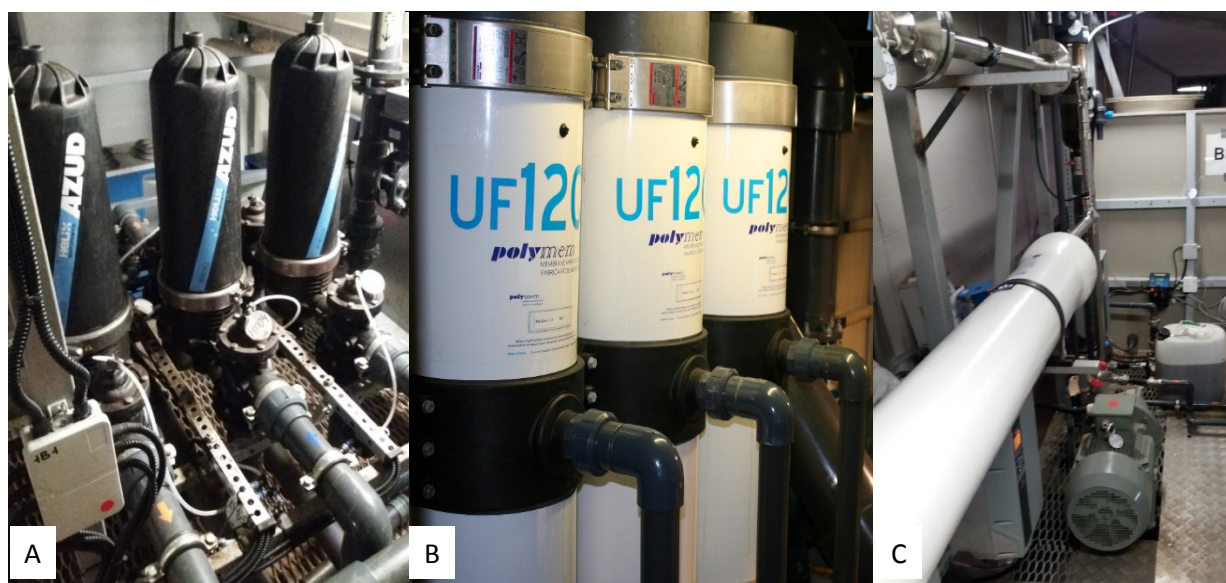
### 3.2.1 Toteutus

Ultrasuodatuksen ja käänteisosmoosiin perustuvan laitteiston soveltuvuutta virtsan käsittelyyn tutkittiin lyhyellä koeajolla BioKymppi Oy:n tiloissa Kiteellä. Suodatuskokeet toteutettiin 24. – 26.1.2018. Tutkimuksissa käytetty virtsa oli peräisin Tampereen kaupungin Hiedanrannan Kuivaamon erottelevista kuivakäymälöistä. Virtsa oli säilötty kuution IBC -konteissa useita kuukausia. Kontit kuljetettiin Kiteelle testejä varten. Testi tehtiin BioKymppi Oy:n biokaasulaitoksen rejektiveden konsentroitintia varten rakennetulla laitteistolla, joka käsitti esisuodatusyksikön (3 kpl), ultrasuodatuksen ja kaksi käänteisosmoosikäsittelyä.

Virtsa pumpattiin ensin kolmiosaisen esisuodatuksen läpi. Kukin esisuodatusyksikkö koostui päällekkäisistä levyistä, jotka päästivät läpi erikokoisia hiukkasia. Esisuodatuksen jälkeen virtsa pumpattiin tasausaltaaseen, josta se johdettiin ultrasuodatusjärjestelmään. Järjestelmä käsitti niin ikään kolmivaiheisen suodatusjärjestelmän. Ultrasuodatuksen jälkeen virtsa edelleen johdettiin tasausaltaaseen, josta se pumpattiin kaksivaiheisen käänteisosmoosikäsittelyn läpi (kuva 6).

Alkuperäisestä 4,5 m<sup>3</sup>:n virtsasta syntyi noin 500 litraa konsentraattia. Näytteitä otettiin käsittelemättömästä virtsasta, ultrasuodatetusta virtsasta sekä molempien käänteisosmoosiyksiköiden jälkeen puhdistetusta virtsasta sekä virtsakonsentraatista.

Kustakin näytteestä analysoitiin pääravinteet, typpi, fosfori ja kalium, suolat (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, NO<sub>2</sub><sup>-</sup>, Cl<sup>-</sup> ja SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>) ja alkuaineet. Lisäksi analysoitiin haitta-aineet, kuten lääkeaineet ja hormonit, sekä lukuisia määriä muita orgaanisia haitta-aineita, kuten fenoliset yhdisteet, kloorifenolit, ftalaatit, perfluoratut yhdisteet ja torjunta-aineet. Lisäksi virtsakonsentraatista analysoitiin liukoinen typpi ja fosfori. Näytteet analysoitiin kahtena rinnakkaisena toistonäytteenä.



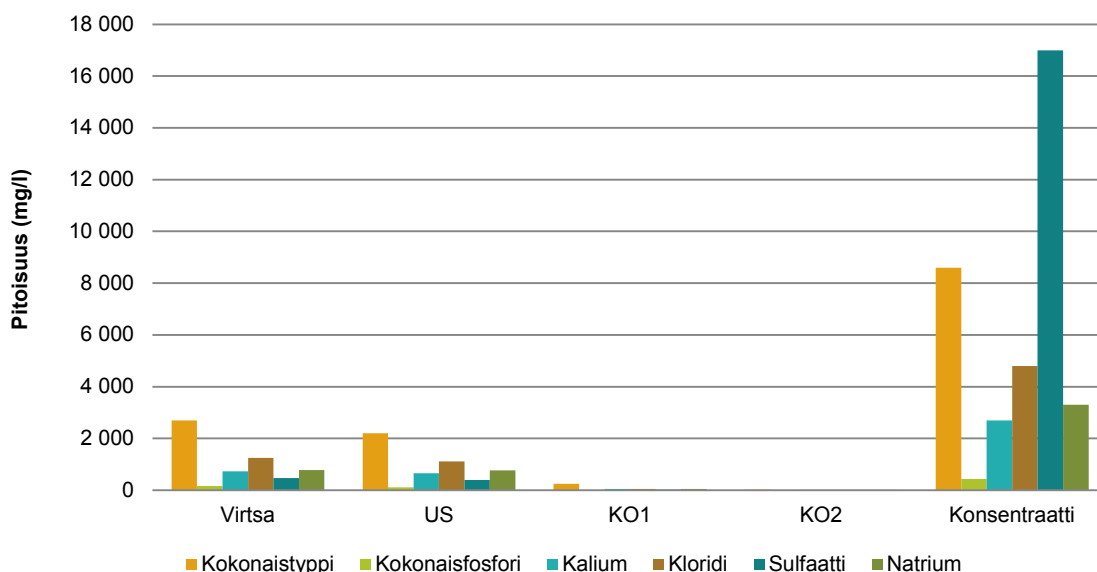
Kuva 6. Virtsan suodatusjärjestelmän osat: a) esisuodatus, b) ultrasuodatusyksiköt ja c) käänteisosmoosi I, jonka taustalla tasausallas. (© MORTTI-hanke)

### 3.2.2 Suodatuskokeiden tulokset ja niiden arviointi

Analyysitulosten mukaan virtsakonsentraatin typpi- ja fosfori olivat kokonaisuudessaan liukoisessa muodossa eli tuloksissa esitetyt kokonaistypen ja liukoisen typen pitoisuudet ovat siten samat.

Kuvassa 7 on esitetty typen, fosforin ja kaliumin sekä kloridin, sulfaatin ja natriumin pitoisuudet käsittelemättömässä virtsassa, ultrasuodatuksen jälkeen, käänteisosmoosin I ja II vaiheiden jälkeen ja

virtsakonsentraatissa. Kaikki ravinteiden, suolojen, alkuaineiden ja mikrobiologisten määritysten tulokset eri käsittelyvaiheissa on esitetty taulukossa 8.



Kuva 7. Virtsan, ultrasuodatuksella (US) ja käänteisosmoosikäsittelyillä (KO1 ja KO2) käsitellyn virtsan sekä virtsakonsentraatin kokonaistyyppi-, kokonaisfosfori- ja kaliumpitoisuudet sekä kloridi-, sulfaatti- ja natriumpitoisuudet. Kokonaistyyppi oli kokonaisuudessaan liukoisessa muodossa.

Puhdistetun virtsan pääravinteiden (NPK) pitoisuudet putosivat vähintään sadasosaan käsittelemättömään virtsaan verrattuna. Prosessi toimi erittäin hyvin virtsan puhdistamisessa, sillä paitsi pääravinteiden (NPK) vähenemä, myös suolojen ( $\text{Cl}^-$  ja  $\text{Na}^+$ ) pitoisuudet putosivat vähintään 1/200 osaan käsittelemättömään virtsaan verrattuna. Sulfaatin ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) pitoisuus ei vähentynyt yhtä paljon, ollen noin 1/90 käsittelemättömään virtsaan verrattuna. Tulosten mukaan puhdistettu virtsa täytti kemialliselta laadultaan jopa talousvesiä koskevat laatuvaatimukset (taulukko 8).

Virtsakonsentraatin pääravinteiden pitoisuudet olivat noin 3-4 -kertaiset käsittelemättömään virtsaan verrattuna. Virtsakonsentraatin kuiva-ainepitoisuus oli 3,7 % ja NPK suhde on noin 23:1:7. Myös suolapitoisuus väkevoitui virtsakonsentraatissa noin nelinkertaiseksi käsittelemättömään virtsaan verrattuna. Sulfaatin pitoisuus konsentroiti jopa 35-kertaiseksi. Virtsakonsentraattiin konsentroituivat pääsääntöisesti myös kaikki alkuaineet, mukaan lukien haitalliset metallit, mutta kuiva-ainepitoisuutta kohden laskettuna ne eivät ylittäneet lannoitevalmisteita koskevan asetuksen (Maa- ja metsätalousministeriö 2011) raja-arvoja, vaan jäivät selvästi niiden alle (taulukko 9).

Virtsasta, konsentraatista tai suodatetuista virtsajakeista ei löytynyt *E.coli* tai *Salmonella*-bakteereita. Kuvassa 8 näkyy, kuinka virtsa puhdistui prosessin kuluessa ja miltä prosessin tuloksena saatu konsentroidu virtsa näytti.



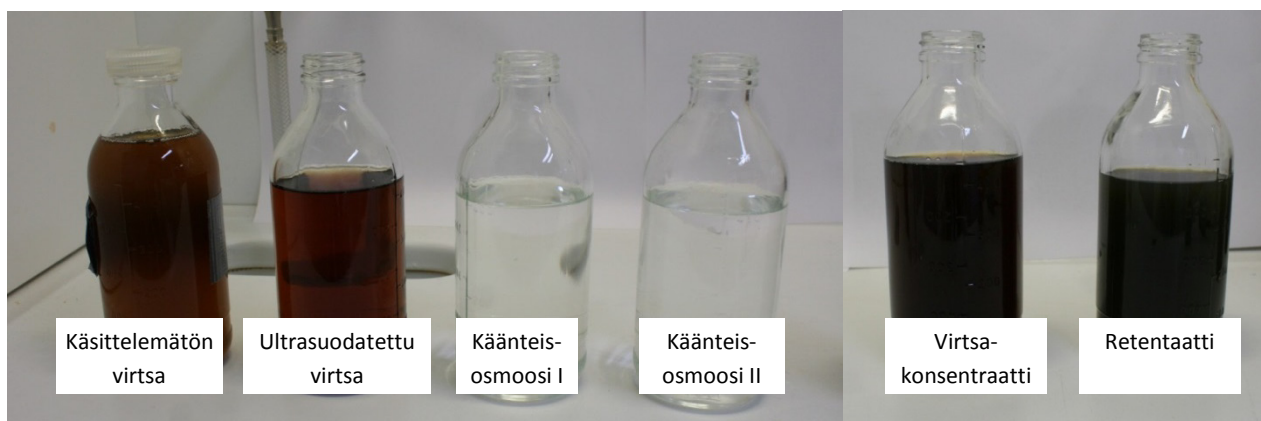
Taulukko 8. Ravinteiden, suolojen, alkuaineiden ja mikrobiologisten analyysien tulokset käsittelemättömässä virtsassa, eri käsittelyvaiheiden jälkeen sekä virtsakonsentraatissa. Vertailun vuoksi talousveden laatuvaatimukset (STMa 1352/2015).

Määrittäminen	Käsittelemättömän virtsa (mg/l)	Ultrasonodotettu virtsa (mg/l)	Käänteis-osmoosi I (mg/l)	Käänteis-osmoosi II (mg/l)	Virtsakonsentraatti (mg/l)	STMa (1352/2015) (mg/l)
Kokonaistyyppi	2 700	2 200	245	21	8 600	
NO <sub>3</sub> -N	1,1	<0,25	<0,25	<0,25	<0,25	11
NO <sub>2</sub> -N	0,015	<0,015	<0,015	<0,015	0,25	0,015
Kokonaisfosfori	165	115	0,48	0,027	430	
Kalium	730	655	50	4,1	2 700	
Kloridi	1 250	1 115	51	2,5	4 800	100
Sulfaatti	475	1 115	51	2,5	17 000	250
Fluoridi	<0,15	0,8	<0,15	<0,15	<0,15	1,5
Arseeni	0,0076	0,0071	<0,0002	<0,0002	0,040	0,010
Boori	0,395	0,310	0,120	<0,100	0,770	
Kadmium	0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	0,00022	5
Kalsium	0,0175	0,017	0,0006	<0,0005	0,087	
Koboltti	<0,005	0,009	<0,005	<0,005	0,029	
Kromi	<0,005	0,031	0,017	<0,005	0,44	0,05
Kupari	0,044	0,013	0,011	<0,01	0,060	2,0
Lyijy	<0,0004	<0,0004	<0,0004	<0,0004	0,00054	0,010
Magnesium	3,25	1,88	0,1	<0,2	12	
Mangaani	<0,005	0,052	<0,005	<0,005	0,130	0,050
Molybdeeni	0,015	0,0086	0,0008	<0,0001	0,055	
Natrium	780	765	46,5	4,1	3300	
Nikkeli	0,0026	0,024	0,0018	<0,0005	0,180	0,020
Rauta	0,06	1,35	0,019	<0,00001	2,5	0,20
Seleen	0,0082	0,0038	<0,001	<0,001	0,027	0,010
Sinkki	0,071	0,026	<0,020	<0,020	0,092	

Taulukko 9. Virtsakonsentraatin ravinne- ja haitallisten metallien pitoisuudet, sekä *E.coli* ja *Salmonella* -määritysten tulokset.

Näyte	Virtsakonsentraatti (mg/l)	Virtsakonsentraatti (mg/kg ka)	Lannoitevalmisteiden laatu, haitallisten aineiden enimmäispitoisuudet (mg/kg ka) (MMMa 24/2011)
Kuiva-aine (%)	3,7		
Kokonaistyyppi (mg/l)	8 600	232000	
Kokonaisfosfori (mg/l)	430	11600	
Kalium (mg/l)	2700	72900	
Kromi (µg/l)	440	11,89	300
Kupari (µg/l)	60	1,62	600
Sinkki (µg/l)	92	2,49	1500
Kadmium (µg/l)	0,22	0,01	1,5
Nikkeli (µg/l)	180	4,86	100
Lyijy (µg/l)	0,54	0,01	100
Arseeni (µg/l)	40	1,08	25
<i>E.coli</i> (pmy/g)	0	0	0
<i>Salmonella</i> (/25 g)	Ei todettu	Ei todettu	Ei todettu





Kuva 8. Käsittelemätöntä virtsaa ja eri vaiheiden jälkeen puhdistettua virtsaa sekä käsittelyn jälkeen tuloksena saatua virtsakonsentraattia ja prosessin sivutuotteena tullutta retentaattia, joka kierrätetään biokaasujärjestelmään takaisin. (© MORTTI-hanke)

Virtsasta, puhdistetusta virtsasta ja virtsakonsentraatista tutkittiin myös lääkeaine- ja hormonijäämät sekä lukuisia joukko erilaisia haitta-aineita, yhteensä 326 eri ainetta. Liitteessä 2 on esitetty luettelo kaikista tutkituista haitta- ja lääkeaineista. Tulosten perusteella suodatusjärjestelmä poisti tai vähensi merkittävästi useita virtsassa esiintyviä haitta- ja lääkeaineita (taulukko 10), sillä puhdistetusta virtsasta löytyi ainoastaan kahdeksaa eri haitta-ainetta ja viittä eri lääkeainetta.

Virtsakonsentraattiin väkevoiti virtsassa olevia lääkeaineita, joista esiintyi runsaimmin ibuprofeenia, ketoprofeenia, naprokseenia ja parasetamolia, jotka ovat yleisesti käytettyjä tulehduskipu- ja kuumelääkkeitä ja jotka ovat pääsääntöisesti biohajoavia. Niiden pitoisuudet olivat konsentraatissa kuitenkin samaa suuruusluokkaa, kuin käsittelemättömässä vanhentetussa virtsassa, jota on käytetty lannoitustesteissä. Testien mukaan virtsan lannoitekäytössä lääke- ja haitta-aineiden ei ole kuitenkaan toistaiseksi todettu kertyvän viljakasveihin tai maaperään. Toisaalta riski kemikaalijäämien kulkeutumiseen ravintoketjussa on olemassa ja lisää tutkimuksia tarvitaan näiltä osin. Myöskään suolojen ei todettu kertyvän maaperään kolmen vuoden seurantatutkimuksen aikana (Viskari ym. 2018). Jotkin lääkeaineet, kuten fluoksetiini, karvediloli ja N4-asetyyilisulfametoksaksoli, sitalopraami, sulfametoksaksoli, trimetoprim ja verapamiili esiintyivät ainoastaan käsittelemättömässä virtsassa, eikä enää puhdistetussa virtsassa tai virtsakonsentraatissa, mikä viittaisi siihen, että ne jäävät suodatusjärjestelmään. Puhdistetusta virtsasta löytyi viittä eri lääkeainetta hyvin pieninä määrinä: 5-metyylibentsotriatsolia, fluoksetiinia, kofeiinia, losartaania, ja parasetamolia.

Fenolisia yhdisteitä esiintyy virtsassa luonnostaan hajoamistuotteina. Esimerkiksi tupakoitsijoiden virtsassa saattaa esiintyä runsaasti fenolisia yhdisteitä. Tällaisia ovat esimerkiksi fenoli, o- ja p- kresolit, joita tämänkin tutkimuksen virtsanäytteissä esiintyi. Kaikki fenoliset yhdisteet myös näyttivät konsentroituvan virtsakonsentraattiin ja niiden pitoisuudet selkeästi vähenivät tai yhdisteitä ei enää ollut mitattavissa puhdistetussa virtsassa. Poikkeuksena o- ja m-kresoli ja m-etyylifenoli, joita esiintyi saman verran tai enemmän kuin käsittelemättömässä virtsassa.

Ftalaattien osalta ei selkeää trendiä käsittelyn suhteen esiintynyt ja löydettyjen ftalaattien pitoisuudet olivat varsin pieniä. On mahdollista, että niiden esiintyminen näytteissä johtuu kontaminaatiosta tai muoviasioista, joissa virtsaa on säilytetty.

Käsittelemättömästä virtsasta löytyi PFC-yhdisteistä perfluorobutaanihappoa  $1,2 \mu\text{g/l}$ , mutta sitä ei enää löytynyt puhdistetusta virtsasta tai virtsakonsentraatista. Torjunta-aine 2,4-dikloorifenolin kohdalla tilanne oli päinvastainen. Ilmeisesti sen pitoisuus jäi virtsassa ja puhdistetussa virtsassa alle määrittämiskraan, mutta se konsentroitui prosessissa virtsakonsentraattiin mitattavaksi pitoisuudeksi.

Löydettyjen haitta-aineiden pitoisuudet virtsassa olivat lähes poikkeuksetta samaa suuruusluokkaa, kuin aiemmissa tutkimuksissa on havaittu (Viskari ym. 2018). Virtsakonsentraattiin konsentroitui erityisesti 2- kloorifenolia, pyrokatekolia, 2,3, dimetyylifenolia, o-, p-, ja m-kresoleita, fenolia ja hydrokinoonia.

Taulukko 10. Löydetyt lääkeaineet, hormonit ja haitta-aineet virtsasta, puhdistetusta virtsasta eri käsittelyvaiheiden jälkeen sekä virtsakonsentraatista. Otsikkoriveillä suluissa kokonaismäärä analysoiduista yhdisteistä.

Näyte	Käsitlemätön virtsa (mg/l)	Puhdistettu virtsa *) (mg/l)	Konsentraatti (mg/l)
<b>Lääkeaineet (126)</b>			
4-Asetamidoantipyrine	0,008		0,045
4-Formyyliaminoantipyrini	0,002		0,014
5-metyylibentsotriatsoli		0,0002	
Asetanilidi			0,013
Atorvastatiini			0,005
Atsitromysiini			0,003
Betsafibraatti	0,0008		0,004
Bisoprololi (β-Adrenergics)	0,003		0,010
Desloratadiini	0,0006		
Diklofenaakki	0,004		0,012
Fluoksetiini	0,0005	0,0001	
Ibuprofeeni	1,75		5,3
Karbamatsepiini	0,0007		0,004
Karvediloli	0,0004		
Ketiapiini	0,0007		0,005
Ketoprofeeni	0,043		0,120
Klotsapiini	0,002		0,0006
Kofeiini	2,45	0,0004	0,006
Ksylometatsoliini	0,0001		0,0003
Lamotrigiini	0,015		0,035
Losartaani	0,007	0,00004	0,050
Metoprololi	0,002		0,012
Mirtatsapiini	0,003		0,0008
N4-Asetyyliisulfametoksatsoli	0,001		
Naprokseeni	0,350		0,800
Parasetamoli	0,245	0,0003	2,0
Propanololi	0,003		0,001
Sertraliini ja norsertraliini	0,002		0,002
Setiritsiini	0,145		0,270
Siprofloksasiini	0,015		0,061
Sitalopraami	0,009		
Sulfadiatsiini	0,024		0,079
Sulfameratsiini	0,005		0,026
Sulfametoksatsoli	0,011		
Tetrasykliini	0,005		0,019
Tramadoli	0,016		0,056
Trimetoprim	0,002		
Venlafaksiini	0,001		0,025
Verapamiili	0,0004		
<b>Hormonit (8)</b>			
Estrioli	0,010		0,042
Estroni	0,003		0,002
<b>Fenoliset yhdisteet (49)</b>			
2-Kloorifenoli	<0,200		<1,0
1,2-dihydroksibentseeni (pyrokatekoli)	<8,0		<100
2,3-Dimetyylifenoli	<1,1	<0,200	<3,5

2,5-Dimetyylifenoli			0,011
2-Metyylifenoli (o-kresoli)		0,036	0,240
3-Metyylifenoli (m-kresoli)	0,020	0,018	0,135
4-Etyylifenoli	0,035	0,005	0,195
4-Metyylifenoli (p-kresoli)	4,1	0,305	12,5
Bisfenoli A			0,018
Fenoli	4,5	0,750	23,0
Hydrokinoni	0,105		0,545
m-Etyylifenoli		0,005	0,086
Resorsinoli			0,063
<b>Ftalaatit (11)</b>			
Dimetyyliftalaatti (DMP)	0,0003		
Di-isobutylyftalaatti (DiBP)	0,001	0,002	0,002
Dibutylyftalaatti			0,0006
<b>Alkyyliifenolit ja etoksylaatit (12)</b>			
<b>Torjunta-aineet (96)</b>			
2,4-Dikloorifenoli			0,001
<b>Perfluoratut yhdisteet (PFC) (24)</b>			
Perfluorobutaanihappo	0,001		
*) Ultrasuodatuksen (US) ja käänteisosmoosikäsittelyiden (KO1 ja KO2) jälkeen			

Kaiken kaikkiaan virtsan suodatuskokeet toteutettiin onnistuneesti. Tuloksena saatiin tilavuudeltaan noin kymmenesosaan konsentroitua virtsakonsentraattia, joka täytti kemialliselta turvallisuudeltaan (haitalliset metallit) ja mikrobiologiselta laadultaan lannoitevalmisteita koskevan asetuksen vaatimukset ja olisi niiden perusteella soveltuvaa käytettäväksi esimerkiksi maanparannusaineena tai lannoitevalmisteenä. Lisäksi saatiin puhdistettua virtsaa, joka kemiallisilta laatuvaatimuksiltaan täytti talousvedelle asetetut laatuvaatimukset ja niiltä osin olisi turvallista jopa laskea ympäristöön.

Ultrasuodatuksen ja käänteisosmoosiin perustuva suodatusjärjestelmä vaikutti lupaavalta teknikalta virtsan konsentrintiin ja puhdistamiseen. Jotta päästäisiin toimivaan sovellukseen, tarvitaan vielä pidempiaikaista kokemusta laitteiston käytöstä ja toimivuudesta, sekä käyttö- ja huoltokustannuksista. Laitteen toimittajalla olisi mahdollista tehdä ultrasuodatuksen ja käänteisosmoositekniikkaan perustuva laitteisto, joka olisi peräkärryssä ja siten siirrettävissä, mutta sen toimivuudesta pitkäaikaiskäytössä ei ole vielä kokemuksia.

### 3.3 Pyrolyysikokeet laboratoriossa

Kiinteän käymäläjätteen käsittelyä varten päätettiin toteuttaa hankkeen ohjausryhmän päätöksellä laboratoriomittakaavan pyrolyysikokeita. Tämä toteutettiin TAMKissa opiskelijaprojektina. TAMKin ympäristötekniikan laboratorioon rakennettiin kuvan 9 mukainen pyrolyysilaitteisto, jolla testattiin Säkylän pilottikäymälän kiinteiden jätösten (ulosteet, seosaine ja paperit) käsittelyä.

Laitteella voitiin pyrolysoida kerrallaan noin 3,25 litraa biomassaa. Uloste sellaisenaan on varsin märkää, sillä sen kosteus voi olla jopa 80 %. Yhdessä seosaineen ja papereiden kanssa massan kosteus oli noin 65 – 70 % ja kuiva-aineen osuus siten 30 – 35 %. Massa esikuivattiin ennen pyrolysointia. Kuvassa 10 näkyy noin tunnin ajan pyrolysoitujen uloste-, paperi- ja seosainemassan hiiltä. Lopputuote oli hajutonta, hygienisoitua hiiltä, josta kuitenkin oli vielä tunnistettavissa alkuperäisen biomassan muotoja.

Kaiken kaikkiaan laboratoriomittakaavan pyrolyysikokeet onnistuivat teknisesti hyvin. Ulosteet, paperi ja käytetty seosaine on mahdollista käsitellä pyrolysoimalla haitattomaksi, mutta käsittelyn tekninen optimointi, kustannustehokkuus ja tarvittava mittakaava vaativat vielä lisätutkimuksia.



Kuva 9. Laboratoriomittakaavan pyrolyysilaitteisto, jota kuumennetaan kaasuliekillä. (© MORTTI-hanke)



Kuva 10. Pyrolysoitua uloste-, paperi- ja seosainemassaa. (© MORTTI-hanke)

## 4 Yhteenveto ja johtopäätökset

### 4.1 Tulosten yhteenveto

MORTTI-hankkeessa selvitettiin ratkaisuja kenttäolosuhteissa ja tapahtumissa syntyvien käymälä-tuotosten ravinteiden talteenottoon ja hyödyntämiseen. Käsiteltäessä virtsa ja uloste syntypaikalla, voidaan säästää käymäläjätevesien kuljetuskustannuksissa jätevedenpuhdistamoille ja samalla on mahdollista vähentää kuljetuksista ja jätevedenkäsittelystä aiheutuvia ympäristövaikutuksia. Arviolta yli kymmenkertainen määrä typpeä voidaan saada takaisin kiertoon verrattuna nykyjärjestelmään, missä jätevedet käsitellään keskitetysti. Myös kiertoon palautuvan fosforin laatu paranee, koska sitä ei tarvitse saostaa kemikaaleilla niukkaliukoiseen muotoon. Lisäksi pienten jätevedenpuhdistamoiden toimintavarmuus paranee, kun pistekuormitus vähenee.

Käymäläjätevesijakeiden jatkojalostaminen ravinteiden talteenottamiseksi kuluttaa energiaa, mutta eroteltujen jakeiden käsittelyn tuloksena voidaan saada suoraan lannoite- ja/tai maanparannuskäyttöön soveltuvia ravinnepitoisia lopputuotteita. Vaihtoehtoisen käsittelymenetelmän ympäristö- ja kustannus-hyöty vallitsevaan käytäntöön verrattuna riippuu merkittävästi siitä, voidaanko lopputuotteen sisältämillä ravinteilla vähentää mineraalilannoitteiden valmistusta ja käyttöä. Kustannushyötyyn vaikuttaa myös paikalliset olosuhteet ja etenkin tapahtuma- ja muiden ylimääräisinä pistekuormina jätevedenpuhdistamolle johdettavien jätevesien (esim. metsäkäymälät) käsittelymaksut, jotka voivat vastaanottavasta puhdistamosta riippuen vaihdella melko paljon.

Hankkeessa pilotoitiin Ruotsin maataloustieteellisen yliopiston (SLU) kehittämää alkalista haihdutusmenetelmää, jossa virtsan pH nostettiin korkeaksi imeyttämällä se kantoaineena toimivaan tuhka-kalkkiseokseen ja haihduttamalla lämmityksen avulla ylimääräinen neste. Nostamalla pH riittävän korkeaksi, estettiin virtsan urean hajoaminen ja tehostettiin samalla typen talteenottoa. Ulosteen käsittelylle ei löydetty kenttäolosuhteisiin soveltuvaa tavanomaista kompostointia korvaavaa käsittelyä, joten pilotoinnin yhteydessä kerätty ulostejae kompostoitui.

Uutta menetelmää pilotoitiin Porin prikaatin Säkylän varuskunnan harjoitusalueella, koska kenttäolosuhteet toimivat luontevana paikkana testata syntypaikkaerotteluun kehitettyä menetelmää ja varusmiehet tuottivat tarkoitukseen soveltuvaa hyvälaatuista raaka-ainetta. Puolustusvoimat järjestävät jätehuollon ja sanitaation myös leiriolosuhteissa, mutta 2016 voimaan astunut biohajoavan jätteen kaatopaikkakielto sekä nestemäisen käymäläjätteen kallis kuljettaminen imuautoilla jätevedenpuhdistamoille käsiteltäviksi ovat luoneet tarpeen kehittää sanitaatiota ravinteiden talteenoton tehostamiseksi ja kuljetuskustannusten pienentämiseksi.

MORTTI-hankkeen kenttäkäymälään rekisteröityi tuhatkunta käyttökertaa ja käymälässä käsiteltiin arviolta satoja litroja virtsaa. Kenttäkäymälän käyttöaktiivisuus jäi kuitenkin huomattavasti odotettua pienemmäksi. Virtsasta syntyi jauhemaista lopputuotetta, joka painoi alle kymmenesosan alkuperäiseen virtsaan verrattuna. Etenkin virtsan sisältämä typpi konsentroitui tehokkaasti lopputuotteeseen. Saatujen analyysitulosten perusteella ei voida kuitenkaan tehdä yleispäteviä johtopäätöksiä menetelmällä tuotettavan lopputuotteen laadusta, koska käsittelyjärjestelmän kuormitus jäi mitoitettua huomattavasti alhaisemmaksi.

Kenttäkäymälään johdetusta virtsasta löytyi kaikkiaan yhdeksää lääkeainetta, neljää hormonia, seitsemää fenoliyhdistettä, kolmea ftalaattia ja yhtä torjunta-ainetta. Löydettyjen lääkeaineiden kirjo oli kuitenkin selvästi pienempi kuin aiemmissa tutkimuksissa, missä virtsaa kerättiin suurelta yleisömäärältä. Lopputuotteesta analysoitiin yli 300 orgaanista haitta-ainetta, lääkeainetta ja hormonia, joista löytyi viittä lääkeainetta ja kahta fenolista yhdistettä. Löydetty pitoisuudet olivat kuitenkin melko pieniä. Suurin yksittäinen aine oli ibuprofeeni, jonka pitoisuus oli hieman alle 20 mg/kg ka. Määrä on alle kahdeskymmenesosa yhden Burana -tabletin sisältämästä vaikuttavasta aineesta.



Tuhkassa oli lähtökohtaisesti korkea fosfori- ja kaliumpitoisuus, joten virtsan imeytyminen ei merkittävästi lisännyt niiden määrää lopputuotteessa varsinkin, kun laitteiston kuormitus jäi odotettua alhaisemmaksi. Virtsan sisältämät suolat kertyivät tuhkaan myös tehokkaasti. Kadmiumia lukuun ottamatta haitallisia metalleja ei tuhkassa ollut lannoitevalmisteita koskevan asetuksen raja-arvoja ylittäviä määriä pelto- tai puutarhaviljelykäyttöä ajatellen, eikä niitä virtsan mukana myöskään kertynyt lisää. Kadmiumin pitoisuus tuhkassa sen sijaan oli jo taustamittauksessa korkeampi, kuin mitä maa- ja puutarhataloudessa käytettävien lannoitevalmisteiden on sallittua sisältää. Sen vuoksi lopputuotteena syntyvää tuhka-kalkkiseosta, johon virtsan ravinteet on imeytetty, olisi mahdollista käyttää lannoitteena vain, jos käytettävä tuhka täyttäisi sellaisenaan lainsäädännön vaatimukset. Kadmium -raja-arvon ylittävää tuhkaa ei voida siten käyttää tuhka-kalkkiseoksen raaka-aineena. Metsälannoituksessa kadmiumin raja-arvo on korkeampi, mutta virtsaa sisältävää tuhka-kalkkiseosta ei olisi mahdollista käyttää, koska orgaanisen aineksen käyttö metsälannoitteena ei ole nyky-lainsäädännön mukaan sallittua (MMM 24/2011).

Käymälävaunun käytöstä saatiin käyttökokemuksia kolmeltakymmeneltä käyttäjältä. Kerättyjen käyttökokemusten perusteella noin yhdeksän vastaajaa kymmenestä suosittelisi kenttäkäymälää muillekin ja arvioi käyttömukavuuden sekä siisteyden ja hajuttomuuden hyväksi tai erittäin hyväksi.

Säkylän pilotin lisäksi hankkeessa tehtiin Tampereen Hiedanrannassa kerätylle ja säilötylle virtsalle koeajot ultrasuodatus- ja käänteisosmoosilaitteistolla sekä pyrolysoitiin pilottikäymälästä kerättyä ulostetta laboratoriomittakaavassa. Ulosteen pyrolyysikokeiden tavoitteena oli lähinnä selvittää, miten ulostejakeen pyrolysointi onnistuu teknisesti laboratoriomittakaavassa, ei niinkään analysoida saatavaa lopputuotetta. Ulostee, paperi ja käytetty seosaine on mahdollista käsitellä pyrolysoimalla haitattomaksi, mutta käsittelyn tekninen optimointi, kustannustehokkuus ja tarvittava mittakaava vaativat vielä lisätutkimuksia.

Myös ultrasuodatuksen ja käänteisosmoosiin perustuva suodatusjärjestelmä vaikutti lupaavalta tekniikalta virtsan konsentrointiin ja puhdistamiseen. Tuloksena saatiin tilavuudeltaan noin kymmenesosaan konsentroitua virtsakonsentraattia, joka täytti kemialliselta ja mikrobiologiselta laadultaan lannoitevalmisteita koskevan asetuksen vaatimukset ja olisi niiden perusteella soveltuvaa käytettäväksi esimerkiksi maanparannusaineena. Lisäksi saatiin puhdistettua virtsaa, joka kemiallisilta laatuvaatimuksiltaan täytti talousvedelle asetetut laatuvaatimukset ja olisi niiltä osin turvallista laskea jopa ympäristöön. Toisaalta virtsakonsentraattiin väkevoitui myös virtsassa olevia lääkkeitä ja suoloja. Tulosten perusteella suodatusjärjestelmä poisti tai vähensi merkittävästi useita virtsassa esiintyviä haitta- ja lääkkeitä, sillä puhdistetusta virtsasta löytyi ainoastaan kahdeksaa eri haitta-ainetta ja viittä eri lääkettä. Löydetty aineet olivat osin samoja kuin kenttäkäymälästä tehdyt löydökset.

## 4.2 Jatkotutkimustarpeet

Hankkeen tulosten perusteella voidaan todeta, että virtsan jatkojalostamiseen on olemassa toimivia menetelmiä, joilla saatavien lopputuotteiden laatu on lähtökohtaisesti käsittelemätöntä virtsaa parempi. Samalla tuotettavien lopputuotteiden kuljetettavuuden ja levitettävyyden kustannustehokkuus paranee. Molemmat hankkeessa testatut menetelmät, alkalinen haihdutus- sekä ultrasuodatus ja käänteisosmoosimenetelmä, vaativat kuitenkin vielä teknistä kehitystä ja optimointia ennen kuin niitä voidaan ottaa käyttöön todellisissa käytännön sovelluksissa ja tarkoitukseen sopivassa mittakaavassa. Alkalisessa haihdutusmenetelmässä etenkin sähkönkulutuksen ja kantoaineen koostumuksen optimointi sekä tekniikkaan liittyvien käyttö- ja huoltotoimenpiteiden automatisointi vaativat vielä kehitystyötä. Menetelmää onkin jo jatkokehitetty mm. RAKI-rahoitteisessa NutriCity-hankkeessa, jossa sitä on pilotoitu virtsan erotteluvan huuhtelukäymälän ja vedettömän urinaalin tuottaman virtsan käsittelyssä jatkuvatoimisena. Muun muassa energiankulutusta on saatu laskettua merkittävästi. Myös ultrasuodatus ja käänteisosmoosimenetelmän osalta tarvitaan pidempiaikaista kokemusta laitteiston käytöstä ja toimivuudesta sekä käyttö- ja huoltokustannuksista.

Tuskin mitään muuta potentiaalista lannoitevalmistetta on tutkittu niin tarkasti lääke- ja haitta-aineiden osalta kuin eroteltua virtsaa. Vaikka lääke- ja haitta-aineita ei lainsäädännön tai muiden määräysten mukaan lannoitevalmisteita tarvitse mitata, niiden mahdollinen esiintyminen herättää aina kysymyksiä varsinkin kun on kyse ihmisjätöksistä. Olisi syytä miettiä, kuinka pitkälle analytiikassa on tarpeen esimerkiksi virtsan osalta mennä. Virtsassa esiintyy runsain määrin orgaanisia yhdisteitä jo luonnostaan, ilman mitään erityistä lisäaltistusta, ja vain sellaisia yhdisteitä tai yhdisteiden hajoamistuotteita, joita syömme, juomme, hengitämme tai altistumme ihokosketuksen kautta. Koska olemme joka tapauksessa kemikaalien ympäröimiä, on selvää, että näitä yhdisteitä löytyy myös eritteistä. Toistaiseksi niiden esiintymisestä ei ole todettu riskiä esimerkiksi lannoitekäytölle.

Myös lainsäädännöllisiä muutoksia tarvitaan, jotta uudenlaiset kierrätyslannoitteet saadaan jatkossa tehokkaasti hyötykäyttöön ja niiden sisältämät ravinteet kiertoön. Nykyinen kansallinen lannoitelainsäädäntö on monimutkainen, eikä edes tunnista ihmisperäisten raaka-aineiden käyttöä lannoitteiden valmistuksessa. Sen sijaan käyttö maanparannusaineina on mahdollista.

Kansalliseen lannoitevalmisteiden lainsäädäntöön on luvassa muutoksia tulevina vuosina EU:n lannoiteasetuksen myötä. Uutta asetusta tullaan soveltamaan kesästä 2022 alkaen ja siihen sisältyvät epäorgaanisten lannoitevalmisteiden lisäksi myös orgaaniset lannoitevalmisteet, kuten mädätteet ja kompostit. Kuitenkin esimerkiksi puhdistamoliete tai eroteltu virtsa on raaka-aineina rajattu asetuksen ulkopuolelle, joten niistä valmistetut lannoitevalmisteet jäävät jatkossa kansallisella lainsäädännöllä säädeltäviksi. Ihmisperäisiin orgaanisiin lannoitevalmisteisiin ja niiden hyväksymiseen liittyvät esteet tulisikin huomioida kansallista lannoitelainsäädäntöä uudistettaessa.

### 4.3 Johtopäätökset

- 1 Vaihtoehtoisille sanitaatoratkaisuille olisi tarvetta ja kysyntää kenttä- ja tapahtumaolosuhteissa, kunhan tekniset ratkaisut saadaan riittävän luotettaviksi ja helppokäyttöisiksi. Virtsan erotteleva kenttäkäymälä on mahdollista saada toimivaksi kokonaisuudeksi, mutta virtsan käsittelyjärjestelmä vaatii vielä teknistä kehittämistä ja testaamista, jotta se toimii luotettavasti.
- 2 Virtsan jatkojalostamiseen on olemassa useampiakin potentiaalisia menetelmiä, joilla lääke- ja haitta-aineiden määrä vähenee ja ravinteet saadaan konsentroitua pienempään tilavuuteen. Haitallisten metallien ja suolojen konsentroituminen pitää kuitenkin huomioida lopputuotteiden laadussa.
- 3 Kierrätysravinnetuotteilla voidaan saavuttaa kustannus- ja ympäristöhyötyjä verrattuna nykyisin käytössä oleviin järjestelmiin, mikäli ravinteiden käytöllä voidaan vähentää teollisten lannoitevalmisteiden valmistusta ja käyttöä ja jatkojalostamiseen käytettävä energia on kohtuullinen tai tuotettu uusiutuvalla energialla.
- 4 Lainsäädäntöä on kehitettävä joustavammaksi ja selkeämmäksi kierrätysravinnetuotteiden osalta. Ihmisperäiset raaka-aineet kierrätysravinnetuotteiden valmistuksessa tulisi hyväksyä ja niiden käyttöön liittyvät esteet tulisi poistaa kansallista lannoitelainsäädäntöä uudistettaessa, mikäli kierrätyslannoitteilta vaadittavat edellytykset muilta osin täyttyvät. Ravinnekiertoa sinällään kannatetaan laajasti, mutta ihmisperäisten ravinnepojakeiden hyötykäyttö on haastavaa lainsäädännöllisten esteiden ja asenteiden vuoksi.

## LÄHTEET

- Aalto-yliopisto. 2019. NPHarvest. [www.aalto.fi/fi/npharvest](http://www.aalto.fi/fi/npharvest) [Päivitetty 7.11.2019.]
- Afolabi, O., Sohail, M., Thomas, C.L.P. 2017. Characterization of solid fuel chars recovered from microwave hydrothermal carbonization of human biowaste. *Energy* 134, 74-89. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.06.010>
- Albers, M., Helle, H., Varpula, T., Itävaara, M., Kapanen, A., Vikman, M. 2003. Kompostointiprosessin monitorointi ja ohjaus – Kirjallisuusselvitys. VTT TIEDOTTEITA 2207, 86 s. <https://www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/2003/T2207.pdf>
- Anand, C.K., Apul, D.S. 2014. Composting toilets as a sustainable alternative to urban sanitation – A review. *Waste Management* 34(2), 329-343. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2013.10.006>
- Aguado, D., Barat, R., Bouzab, A., Secob, A., Ferrer, J. 2019. P-recovery in a pilot-scale struvite crystallisation reactor for source separated urine systems using seawater and magnesium chloride as magnesium sources. *Sci.Tot.Environ.* 672, 88-96. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.03.485>
- Antonini, S., Nguyen, P., Arnold, U., Eichert, T., Clemens, J. 2012. Solar thermal evaporation of human urine for nitrogen and phosphorus recovery in Vietnam. *Sci. Tot.Environ.* 586, 650-657. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2011.11.055>
- Atkinson, C., Fitzgerald, J., Higgs, N. 2010. Potential mechanisms for achieving agricultural benefits from biochar application to temperate soils: a review. *Plant Soil* 337(1), 1-18. <https://doi.org/10.1007/s11104-010-0464-5>
- Bill & Melinda Gates Foundation. 2019. Reinvent the Toilet Challenge & Expo, Strategy Overview. [www.gatesfoundation.org/What-We-Do/Global-Growth-and-Opportunity/Water-Sanitation-and-Hygiene/Reinvent-the-Toilet-Challenge-and-Expo](http://www.gatesfoundation.org/What-We-Do/Global-Growth-and-Opportunity/Water-Sanitation-and-Hygiene/Reinvent-the-Toilet-Challenge-and-Expo) [Viitattu 5.4.2019]
- Cordell, D., Drangert, J.-O., White, S. 2009. The story of phosphorus: Global food security and food for thought. *Global Environmental Change* 19(2): 292-305. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2008.10.009>
- Eliades, A. 2019. Hot Compost – Composting in 18 Days. <https://deepgreenpermaculture.com/diy-instructions/hot-compost-composting-in-18-days/> [Viitattu 9.4.2019]
- Etter, B., Udert, K.M., Gounden, T. (editors) 2015. VUNA Final Report. Eawag, Dübendorf, Switzerland. [https://www.eawag.ch/fileadmin/Domain1/Abteilungen/eng/projekte/vuna/doc/VUNA\\_Final\\_Report\\_2015.pdf](https://www.eawag.ch/fileadmin/Domain1/Abteilungen/eng/projekte/vuna/doc/VUNA_Final_Report_2015.pdf)
- Etter, B., Tilley, E., Khadka, R., Udert, K.M. 2011. Low-cost struvite production using source-separated urine in Nepal. *Water Research* 45(2), 852-862. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2010.10.007>
- EU Horizon 2020 Research and Innovation programme. 2019. The Run4Life project. <https://run4life-project.eu/> [Viitattu 15.3.2019]
- Fakkaew, K., Koottatep, T., Polprasert, C. 2018. Faecal sludge treatment and utilization by hydrothermal carbonization. *Jour. Environ. Mang.* 216, 421-426. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.09.031>
- Fredriksen, H., Skakkebaek, N. E. & Andersson, A.-M. 2007. Metabolism of phthalates in humans. Review. *Mol. Nutr. Food Rtes.* 51:899-911. <https://doi.org/10.1002/mnfr.200600243>
- Föhr, J., Seppänen, T., Suikki, J., Soininen, H., Ranta, T. 2015. Torrefioidun biohiilipelletin kirjallisuustutkimus ja koeajot pilottilaitoksessa, Lappeenrannan teknillinen yliopisto & Mikkelin ammattikorkeakoulu, LUT Tutkimusraportit 46.
- Ganesapillai, M., Simha, P., Gupta, K., Jayan, M. 2016. Nutrient Recovery and Recycling from Human Urine: A Circular Perspective on Sanitation and Food Security. *Procedia engineering* 148, 346-353. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.06.461>
- Ganesapillai, M., Simha, P., Zabaniotou, A. 2015. Closed-loop fertility cycle: Realizing sustainability in sanitation and agricultural production through the design and implementation of nutrient recovery systems for human urine. *Sust. Prod. Consump.* 4, 36-46. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2015.08.004>
- Grau, M.GP., Rhoton, S.L., Brouckaert, C.J., Buckley, C.A. 2015. Evaluation of an automated struvite reactor to recover phosphorus from source-separated urine collected at urine diversion toilets in eThekweni. *Water SA* 41(3), 383-389. <http://dx.doi.org/10.4314/wsa.v41i3.10>
- Hug, A., Udert, K.M. 2013. Struvite precipitation from urine with electrochemical magnesium dosage. *Water Research* 47(1), 289-299. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2012.09.036>
- Humphreys G. 2014. Reinventing the toilet for 2.5 billion in need. *Bull World Health Organ.* 92(7):470-471. <https://dx.doi.org/10.2471%2FBLT.14.020714>
- Helsingin seudun ympäristöpalvelut (HSY). 2019. Palveluhinnasto 2019. <https://hsvesi.fi/app/uploads/2019/04/Palveluhinnasto-2019.pdf>.



- Jönsson, H., Stinzing, A., Vinnerås, B., Salomon, E. 2004. Guidelines on the use of urine and feces on crop production. Stockholm Environment Institute. [http://www.ecosanres.org/pdf\\_files/ESR\\_Publications\\_2004/ESR2web.pdf](http://www.ecosanres.org/pdf_files/ESR_Publications_2004/ESR2web.pdf)
- Karhu, K., Mattila, T., Bergström, I., Regina, K. 2011. Biochar addition to agricultural soil increased CH<sub>4</sub> uptake and water holding capacity - Results from a short-term pilot field study. *Agric. Ecosyst. Environ.* 140(1-2), 309-313. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2010.12.005>
- Karlsson, C. 2019. Teknikutvärdering av urintorkning i pilotskala – Ett fältförsök i Finland. Masteruppsats, Institutionen för energi och teknik, Sveriges lantbruksuniversitet (SLU).
- Kataki, S., West, H., Clarke, M., Baruah, D.C. 2016. Phosphorus recovery as struvite: recent concerns for use of seed, alternative Mg source, nitrogen conservation and fertilizer potential. *Resources, Conservation and Recycling* 107, 142-156.
- KETSU. 2002. Nitrobentseeni. Ehdotus HTP-arvoiksi. Kemian työsuojeluneuvottelukunta.
- Koch, H.M., Rossbach, B., Drexler, H. & Angerer, J. 2003. Internal exposure of the general population to DEHP and other phthalates – determination of secondary and primary phthalate monoester metabolites in urine. *Env. Res.* 93(2): 177-185. [https://doi.org/10.1016/S0013-9351\(03\)00083-5](https://doi.org/10.1016/S0013-9351(03)00083-5)
- Krähenbühl, M., Etter, B., Udert, K., M. 2015. Pretreated magnesite as a source of low-cost magnesium for producing struvite from urine in Nepal. *Science of the Total Environment* 542(2016), 1155–1161. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.08.060>
- Kujala, M. 2012. Biosampo koulutus- ja tutkimuskeskuksen hitaan pyrolyysireaktorin koeajo. Opinnäytetyö, Kymenlaakson ammattikorkeakoulu, Teknologiaosaaminen, johtaminen. <https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/48984/Kujala%20Mia.pdf?sequence=1>
- Kuntke, P., Smiech, K.M., Bruning, H., Zeeman, G., Saakes, M., Sleutels, T.H.J.A., Hamelers, H.V.M., Buisman, C.J.N. 2012. Ammonium recovery and energy production from urine by a microbial fuel cell. *Water Research* 46(8), 2627-2636. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2012.02.025>
- Käymäläseura Huussi ry. 2019. Käymäläseura Huussi ry:n kotisivut. [www.huussi.net](http://www.huussi.net) [Viitattu 9.4.2019]
- Laitinen, A. 2015. Kolmivaiheisen pyrolyysiprosessin mallintaminen. Pro Gradu -tutkielma, Jyväskylän yliopisto, Kemian laitos. <https://jyx.jyu.fi/bitstream/handle/123456789/48787/URN:NBN:fi:jyu-201602151576.pdf?sequence=1>
- Libra, J., Ro, K., Kammann, C., Funke, A., Berge, N., Neubauer, Y., Titirici, M.-M., Fühner, C., Bens, O., Kern, J., Emmerich, K. 2011. Hydrothermal carbonization of biomass residuals: a comparative review of the chemistry, processes and applications of wet and dry pyrolysis, *Biofuels* 2(1), 89–124. <https://doi.org/10.4155/bfs.10.81>
- Lienert, J., Bürki, T., Escher, B. 2007. Reducing micropollutants with source control: substance flow analysis of 212 pharmaceuticals in feces and urine. *Wat. Sci. Tech.* 56(5), 87-96.
- Liu, X., Li, Z., Zhang, Y., Feng, R., Mahmood, I.B. 2014. Characterization of human manure-derived biochar and energy-balance analysis of slow pyrolysis process. *Waste Manag.* 34(9), 1619-1626. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2014.05.027>
- Liu, T., Lang, Q., Xia, Y., Chen, Z., Li, D., Ma, J., Gai, C., Lie, Z. 2019. Combination of hydrothermal carbonization and oxy-fuel combustion process for sewage sludge treatment: Combustion characteristics and kinetics analysis. *Fuel* 242, 265-276. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.01.035>
- LUKE. 2018. Uutinen: <https://www.luke.fi/uutiset/jatevesilietteiden-kaytto-lannoitteena-ei-ole-uhka-ruokaturvalle/>
- Maa- ja metsätalousministeriö (MMM). 2011. Maa- ja metsätalousministeriön asetus (MMM) 24/ 2011. Maa- ja metsätalousministeriön asetus lannoitevalmisteista.
- Maa- ja metsätalousministeriö (MMM). 2019. Uusi EU-lannoitevalmisteasetus vauhdittaa orgaanisten ja jätöpohjaisten lannoitevalmisteiden käyttöä, MMM:n tiedote 3.7.2019. [https://valtioneuvosto.fi/artikkeli/-/asset\\_publisher/1410837/uusi-eu-lannoitevalmisteasetus-vauhdittaa-orgaanisten-ja-jatopohjaisten-lannoitevalmisteiden-kaytto](https://valtioneuvosto.fi/artikkeli/-/asset_publisher/1410837/uusi-eu-lannoitevalmisteasetus-vauhdittaa-orgaanisten-ja-jatopohjaisten-lannoitevalmisteiden-kaytto)
- Mahoney, R.B., Yacob, T., Ward, B.J., Linden, K.G., Summers, R.S. 2014. Sol-Char Sanitation Biochar and Charcoal Research, Reinvent the Toilet Fair. India 2014. Poster presentation. University of Colorado Boulder. [www.colorado.edu/solchar/research/conference-posters](http://www.colorado.edu/solchar/research/conference-posters)
- Maurer, M., Pronk, W., Larsen, T.A. 2006. Treatment processes for source-separated urine. *Water Research* 40(17), 3151-3166. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2006.07.012>
- Mehta, C., Khunjar, W., Nguyen, V., Tait, S., Batstone, D. 2015. Technologies to Recover Nutrients from Waste Streams: A Critical Review. *Environ.Sci.Tech.* 45(4), 385-427. [doi.org/10.1080/10643389.2013.866621](https://doi.org/10.1080/10643389.2013.866621)
- Müllegger, E., Langergraber, G., Lechner, M. (ed.). 2010. Use of Urine. Sustainable Sanitation Practice, Issue 3. EcoSan Club. <http://www.ecosan.at/spp/issue-03-use-of-urine/issue-03>

- Mäkelä, M.. 2006. Kalvoerotusmenetelmien käyttö kemianteollisuudessa. Tutkintotyö, Tampereen ammattikorkeakoulu. 37 s. <https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/8624/TMP.objres.413.pdf?sequence=2&isAllowed=y>
- Naveed, A., Shim, S., Won, S., Ra, C. 2018. Struvite recovered from various types of wastewaters: Characteristics, soil leaching behavior, and plant growth. *Land Degrad. Dev.* 29(9), 2864-2879. <https://doi.org/10.1002/ldr.3010>
- Nissinen, P. 2019. Lietteen termisten käsittelymenetelmien soveltuvuus Suomeen. Vesihuoltopäivät 15.-16.5.2019, Jyväskylä. [https://www.vvy.fi/site/assets/files/2789/02\\_nissinen\\_petri\\_julkinen.pdf](https://www.vvy.fi/site/assets/files/2789/02_nissinen_petri_julkinen.pdf)
- Onabanjo, T., Patchigolla, K., Wagland, S., Fidalgo, B., Kolios, A., McAdam, E., Parker, A., Williams, L., Tyrrel, S., Cartmell, E. 2016. Energy recovery from human faeces via gasification: A thermodynamic equilibrium modelling approach. *Energy Conversion and Management* 118, 364-376. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.04.005>
- OVA. 2019. Onnettomuuden vaaraa aiheuttavat aiheet – turvallisuusohjeet (OVA-ohjeet). Työterveyslaitos. <https://www.ttl.fi/ova/index.html>
- Pakula, S., Tuukkanen, K., Vilpas, R., Lehtoranta, S., Viskari, E.-L. 2016. Ravinteet kiertoon – Virtsa potentiaalisena lannoitteena, Käymäläseura Huussi ry, Tampere.
- Pitkänen, S., Sikanen L. 2014. Hajautetut biojalostamot – Lähellä resursseja kätevästi. Infokortti 16; Termiset prosessit. [https://docplayer.fi/19458250-Hajautetut-biojalostamot-lahella-resursseja-kestavasti-hankkeen-toimintaa-kuvaavat-infokortit.html#download\\_tab\\_content](https://docplayer.fi/19458250-Hajautetut-biojalostamot-lahella-resursseja-kestavasti-hankkeen-toimintaa-kuvaavat-infokortit.html#download_tab_content)
- Porras, S., Hyytinen, E.-R., Koponen, M., Heinälä, M. & Santonen, T. 2015. Hormonitoimintaa häiritseville kemikaaleille altistuminen työpaikoilla. Esiselvitysprojekti. Työterveyslaitos. Juvenes Print, Tampere. [https://www.julkari.fi/bitstream/handle/10024/125875/Hormonitoimintaa\\_hairitseville\\_kemikaaleille\\_altistuminen\\_web.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://www.julkari.fi/bitstream/handle/10024/125875/Hormonitoimintaa_hairitseville_kemikaaleille_altistuminen_web.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Porras, S., Hartonen, M., Ylinen, K., Louhelainen, K., Tornaes, J., Tuomi, T. & Santonen, T. 2016. Työperäinen altistuminen eräille hormonitoimintaa häiritseville ftalaateille ja fenoleille Suomessa. Työterveyslaitos. Juvenes Print, Tampere. <https://www.julkari.fi/bitstream/handle/10024/131946/Tyoperainen-altistuminen-eraille-hormonitoimintaa-hairitseville-ftalaateille-ja-fenoleille-Suomessa.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Pradhan, S., Mikola, A., Heinonen-Tanski, H., Vahala, R. 2019. Recovery of nitrogen and phosphorus from human urine using membrane and precipitation process. *Jour. Environ. Manag.* 247 (2019), 596-602. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.06.046>
- Pradhan, S., Mikola, A., Sihvonen, A., Vahala, R. 2018. Nitrogen and phosphorus harvesting from liquid waste using membrane (GPHM) – Market potential study: NPHarvest technique - Market potential study. Aalto University Publication Series, Science & Technology 3/2018. <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-60-8110-6>
- Pradhan, S. 2010. Yield and quality of vegetables fertilized with human urine and wood ash, University of Eastern Finland. [http://epublications.uef.fi/pub/urn\\_isbn\\_978-952-61-0062-3/urn\\_isbn\\_978-952-61-0062-3.pdf](http://epublications.uef.fi/pub/urn_isbn_978-952-61-0062-3/urn_isbn_978-952-61-0062-3.pdf)
- Pronk, W., Palmquist, H., Biebow, M., Boller, M. 2006. Nanofiltration for the separation of pharmaceuticals from nutrients in source-separated urine. *Water Research* 40(7), 1405-1412. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2006.01.038>
- Rhotona, S., Graub, M., Brouckaert, C.J., Goundenb, G., Buckley, C.A. 2014. Field operation of a simple struvite reactor to produce phosphorus fertilizer from source-separated urine in Ethekwini. WISA Biennial Conference 2014, 25-28 May, Mbombela, Mpumalanga, South Africa. [https://www.eawag.ch/fileadmin/Domain1/Abteilungen/eng/projekte/vuna/papers/Rhoton2014\\_WISA.pdf](https://www.eawag.ch/fileadmin/Domain1/Abteilungen/eng/projekte/vuna/papers/Rhoton2014_WISA.pdf)
- Rose, C., Parker, A., Jefferson, B. & Cartmell, E. 2015. The characterization of feces and urine: a review of the literature to inform advanced treatment technology. *Crit. Rev. Environ. Sci. Technol.* 45(17), 1827-1879. <https://dx.doi.org/10.1080%2F10643389.2014.1000761>
- Sakthivel, S.R., Tilley, E., Udert, K.M. 2012. Wood ash as a magnesium source for phosphorus recovery from source-separated urine. *Science of the Total Environment* 419(2012), 68–75. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2011.12.065>
- Schürmann, B., Everding, W., Montag, D., Pinnekamp, J. 2012. Fate of pharmaceuticals and bacteria in stored urine during precipitation and drying of struvite. *Water Science and Technology*, 65(10), 1774-1780.
- Senecal J., Vinnerås, B. 2017. Urea stabilisation and concentration for urine-diverting dry toilets: Urine dehydration in ash. *Sci. Tot. Environ.* 586, 650-657. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.02.038>
- Serio, M., Wójtowicz, M., Cosgrove, J., Stapleton, T., Nalette, T., Ewert, M., Lee, J., Fisher, J. 2016. Torrefaction Processing for Human Solid Waste Management, 46th International Conference on Environmental Systems 10-14 July 2016, Vienna, Austria, ICES-2016-341.

- Serio, M., Cosgrove, J., Wójtowicz, M., Lee, J., Kanapathipillai, W., Fisher, J. 2015. Space Applications of Torrefaction Processing. 45th International Conference on Environmental Systems, ICES-2015-291, 12-16 July 2015, Bellevue, Washington. [https://www.researchgate.net/publication/277010957\\_Space\\_Applications\\_of\\_Torrefaction\\_Processing](https://www.researchgate.net/publication/277010957_Space_Applications_of_Torrefaction_Processing)
- Shinogi, Y., Kanri, Y. 2003. Pyrolysis of plant, animal and human waste: physical and chemical characterization of the pyrolytic products. *Bioresource Technology* 90(3), 241-247. [https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(03\)00147-0](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(03)00147-0)
- Simha, P., Senecal, J., Nordin, A., Ilander, C., Vinnerås, B. 2018a. Alkaline dehydration of anion-exchanged human urine: Volume reduction, nutrient recovery and process optimization. *Water Research* 142, 325-336. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.06.001>
- Simha, P., Zabaniotou, A., Ganesapillai, M. 2018b. Continuous urea-nitrogen recycling from human urine: A step towards creating a human excreta based bio-economy. *Jour. Clean. Prod.* 172, 4152-4161. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.01.062>
- Simha, P., Banwasi, P., Mathew, M., Ganesapillai, M. 2016. Adsorptive Resource Recovery from Human Urine: System Design, Parametric Considerations and Response Surface Optimization. *Procedia engineering* 148, 779-786. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.06.557>
- Smith, M., Aber, J., Rynk, R. 2016. Heat Recovery from Composting: A Comprehensive Review of System Design, Recovery Rate, and Utilization. *Compost Science & Utilization*, 25(1), 11-22. <https://doi.org/10.1080/1065657X.2016.1233082>
- Spitzer, R., Mau, V., Gross, A. 2018. Using hydrothermal carbonization for sustainable treatment and reuse of human excreta. *Jour. Clean. Prod.* 205, 955-963. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.09.126>
- Strand, T. 2011. Biohiilen tekeminen jätemateriaalista maanparannuskäyttöön, kandidaatintyö, Lappeenranta teknillinen yliopisto. [http://lutpub.lut.fi/bitstream/handle/10024/76753/Kandidaatinty%C3%B6\\_Strand.pdf?sequence=1](http://lutpub.lut.fi/bitstream/handle/10024/76753/Kandidaatinty%C3%B6_Strand.pdf?sequence=1)
- Tilley, E., Atwater, J., Mavinic, D. 2008. Recovery of struvite from stored human urine. *Environmental Technology*, 29(7), 797-806. <https://doi.org/10.1080/09593330801987129>
- Työterveyslaitos. 2016. Fenoli. Työterveyslaitoksen perustelumuistio fenolin biologisen altistumisindikaattorin toimenpiderajavalle. 2016/11.
- Udert, K., Larsen, T. & Gujer, W. 2006. Fate of major compounds in source-separated urine. *Wat. Sci. Tech.*, 54(11-12), 413-420. DOI: 10.2166/wst.2006.921
- Udert, K.M., Wächter, M. 2012. Complete nutrient recovery from source-separated urine by nitrification and distillation. *Water Research* 46(2), 453-464. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2011.11.020>
- Valtioneuvosto. 2017. Valtioneuvoston asetus 157/ 2017. Valtioneuvoston asetus talousjätevesien käsittelystä viemäriverkostojen ulkopuolisilla alueilla.
- Vilpanen, M., Toivikko, S. 2017. Yhdyskuntalietteen käsittelyn ja hyödyntämisen nykytilannekatsaus. Vesilaitosyhdistyksen monistesarja nro 46, 38 s. [www.vvy.fi/site/assets/files/1621/yhdyskuntalietteen\\_ka\\_sittelyn\\_ja\\_hyo\\_dynta\\_misen\\_nykytilannekatsaus\\_26092017.pdf](http://www.vvy.fi/site/assets/files/1621/yhdyskuntalietteen_ka_sittelyn_ja_hyo_dynta_misen_nykytilannekatsaus_26092017.pdf)
- Vinnerås, B. 2007. Comparison of composting, storage and urea treatment for sanitising of faecal matter and manure. *Bioresource Technology* 98(17), 3317-3321. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2006.07.011>
- Vinnerås, B. 2019. Energia- ja teknologiaosaston päällikkö, Ruotsin maataloustieteellinen yliopisto (SLU), Upsala. Suullinen tiedonanto 5.9.2019. [Björn Vinneråsin antama tieto alkalisessa haihdutusmenetelmässä käytetyn tuhkan alkuperästä.]
- Viskari, E.-L., Honkala, I., Haapamäki, S. ja Pakula S. 2018. Virtsa lannoitteena peltoviljelyssä – Hyödyt, riskit ja mahdollisuudet. Käymäläseura Huussi ry.
- Viskari, E.-L., Vilpas, R., Lehtoranta, S., Pakula, S., Tuukkanen, K. 2017. Erilliskerätyn virtsan lannoitepotentiaali, kokeelliset tutkimukset ja elinkaaritarkastelu, BIOUREA-hankkeen loppuraportti. [http://www.huussi.net/wp-content/uploads/2017/01/Huussi\\_loppuraportti\\_net\\_VALMIS.pdf](http://www.huussi.net/wp-content/uploads/2017/01/Huussi_loppuraportti_net_VALMIS.pdf)
- Volpin, F., Chekli, L., Phuntsho, S., Cho, J., Ghaffour, N., Vrouwenvelder, J.S., Shon, H.K. 2018. Simultaneous phosphorous and nitrogen recovery from source-separated urine: A novel application for fertiliser drawn forward osmosis. *Chemosphere* 203, 482-489. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.03.193>
- VUNA Aurin product label. 2018. [http://www.vuna.ch/content/vuna\\_label.pdf](http://www.vuna.ch/content/vuna_label.pdf) (viitattu 29.6.2018)
- Wang, L., Xia, M., Wang, H., Huang, K., Qian, C., Maravelias, C., Ozin, G. 2018. Greening Ammonia toward the Solar Ammonia Refinery. *Joule* 2: 1055-1074. [https://www.cell.com/joule/pdf/S2542-4351\(18\)30178-8.pdf](https://www.cell.com/joule/pdf/S2542-4351(18)30178-8.pdf)
- Ward, B., Yacob, T., Montoya, L. 2014. Evaluation of Solid Fuel Char Briquettes from Human Waste. *Environmental Science and Technology* 48, 9852-9858. DOI: 10.1021/es500197h
- Weckman, A. 2005. Ravinteet käymälästä peltoon.

- Wei, S., Rossum, F., van de Pol, G., Winkler, M.-K. 2018. Recovery of phosphorus and nitrogen from human urine by struvite precipitation, air stripping and acid scrubbing: A pilot study. *Chemosphere* 212, 1030-1037. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.08.154>
- WHO. 2006. Guidelines for the safe use of wastewater, excreta and greywater - Volume 4. Excreta and greywater use in agriculture. World Health Organisation.
- Winker, M., Vinnerås, B., Muskolus, A., Arnold, U., Clemens, J. 2009. Fertilizer products from new sanitation systems: Their potential values and risks. *Bioresource Technol.* 100(18), 4090-4096. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.03.024>
- Xie, M., Shon, H.K., Gray, S.R., Elimelech, M. 2016. Membrane-based processes for wastewater nutrient recovery: Technology, challenges, and future direction. *Water Research* 89, 210-221. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2015.11.045>
- Xu, X., Jiang, E. 2017. Treatment of urban sludge by hydrothermal carbonization. *Biores. Tech.* 238, 182-187. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.03.174>
- Yacob, T., Fisher, R., Linden, K., Weimer, A. 2018. Pyrolysis of human feces: Gas yield analysis and kinetic modeling. *Waste Manag.* 79, 214-222. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.07.020>
- Zamora, P., Georgieva, T., Heijne, A.T., Sleutels, T.H.J.A., Jeremiasse, A.W., Saakes, M., Buisman, C.J.N., Kuntke, P. 2017. Ammonia recovery from urine in a scaled-up Microbial Electrolysis Cell. *Journal of Power Sources* 356, 491-499. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2017.02.089>

## LIITE 1

### Yhteenveto virtsan ja ulosteen käsittelymenetelmistä ja niiden soveltuvuudesta kenttäkäyttöön

Menetelmä	Lopputuote	Plussat	Miinukset
<b>VIRTSAAN KÄSITTELYMENETELMÄT</b>			
Struviitin saostaminen	MgNH <sub>4</sub> PO <sub>4</sub> •6H <sub>2</sub> O sakka Jäännösneeste	+ Valmis lannoitetuote (kaupallinen tuote) + Yksinkertainen periaate, sovellettavissa kenttäolosuhteisiin	- Vaatii Mg-lisäyksen, kallis - Alhainen typen talteenotto (n. 5 %) - Patogeenien tarttuminen kiteisiin - Rejektivessissä vielä paljon ravinteita, rejektin käsittely
Biologinen nitrifointi ja tislauk	Nestemäinen ravinnepitoinen liuos	+ Valmis lannoitetuote (kaupallinen tuote) + Erinomainen ravinteiden talteenotto + Ei rejektin käsittelytarvetta	- Korkea energiankulutus - Soveltuu parhaiten suuriin yksiköihin - Prosessinhallinta haastava, edellyttää tasaista syöttöä
Ioninvaihto ja haihdutus	Kiinteä ravinnepitoinen massa	+ Erinomainen ravinteiden talteenotto + Ei rejektin käsittelytarvetta + Mahdollinen hankesynergia toteutukseen	- Haitta-aineiden konsentroitumisesta ei tietoa - Ei vielä pilot-mittakaavan tuloksia
Haihdutus ja imeytys tuhkaan (alkalinen haihdutusmenetelmä)	Ravinnepitoinen hiili	+ Erinomainen ravinteiden talteenotto + Ei rejektin käsittelytarvetta + Yksinkertainen periaate, sovellettavissa kenttäolosuhteisiin	- Haitta-aineiden konsentroitumisesta ei tietoa - Ei vielä pilot-mittakaavan tuloksia
Elektrolyysi	Riippuu menetelmästä		- Ei sovellu käytettäväksi itsenäisenä menetelmänä
Adsorptio	Typipitoinen orgaaninen aine	+ Orgaanisten jätevirtojen hyödyntäminen	- Ei vielä pilot-mittakaavan tuloksia - Ei fosforin talteenottoa
Kalvosuodatusmenetelmät (ultrasuodatus, käänteisosmoosi)	Nestemäinen lopputuote	+ Erinomainen ravinteiden talteenotto + Ei rejektin käsittelytarvetta	- Haitta-aineiden konsentroituminen lopputuotteeseen - Prosessinhallinta haastava
Kalvosuodatusmenetelmät (kaasun läpäisevä kalvo)	Nestemäinen tai jauhemainen lopputuote	+ Puhdas lopputuote (kaupallinen tuote) + Erinomainen ravinteiden talteenotto	- Korkean pH:n omaavaa sivuvirtaa syntyy sama määrä kuin syötettä - Ei toimi itsenäisesti ilman valvontaa
<b>ULOSTEEN KÄSITTELYMENETELMÄT</b>			
Kompostointi ja Pika-/lämpökompostointi	Komposti / Maanparannusaine	+ Yksinkertainen prosessi + Edullinen	- Peruskompostointi melko hidas ja tilaa vaativa prosessi - Lämpökompostointi vaatii enemmän säätöä - Haitta-aineiden kohtalo epäselvää molemmissa - Haihtuvat yhdisteet, osa tuestä ja hiilestä haihtuu
Pyrolyysi (hidas)	Biohiili (~35 %) Synteesikaasu (~35 %) Bioöljy (~30 %)	+ Valmis hiilipitoinen maanparannusaine + Voi olla energiaomavarainen, edellyttää synteesituotteiden energiahyödyntämistä + Suurin osa haitta-aineista tuhoutuu	- Tuestä suurin osa haihtuu (70 - 90 %) - Fosforin käyttökelpoisuus riippuu suuresti maaperästä - Joidenkin haitta-aineiden määrä voi jopa kasvaa - Prosessinhallinta haastava kenttäolosuhteissa
Torrefointi	Kuiva, polttoainekäyttöön soveltuva lopputuote (n. 70 %), synteesikaasu (n. 30 %)	+ Osa haitta-aineista tuhoutuu + Parantaa syötteen polttoaineminaisuuksia	- Ravinteita ei saada talteen energiahyödyntämisessä - Prosessinhallinta haastava kenttäolosuhteissa
Kaasutus	Tuotekaasu, tuhka (+ mahd. palamaton hiili)	+ Haitta-aineet tuhoutuvat	- Ravinteita ei saada talteen energiahyödyntämisessä - Prosessinhallinta haastavaa kenttäolosuhteissa
Hydrotermien käsittely (HTC-märkähiilto)	HTC-hiili (n. 50 - 80 %) Synteesikaasua ja -neste	+ Suuri kiinteän lopputuotteen saanto + Soveltuu märille syötteille	- Prosessinhallinta haastavaa kenttäolosuhteissa

## LIITE 2

Analysoidut haitta-aineet, lääkeaineet ja hormonit (µg/l).

Näyte	Menetelmä
<b>Fenoliset yhdisteet</b>	
1,2-dihydroksibentseeni (pyrokatekoli)	SFS-EN ISO 18857-2; ISO17495 mod.
1-Naftoli	
2,3,5-Trimetyylifenoli	
2,3,6-Trimetyylifenoli	
2,3-Dimetyylifenoli	
2,3-dinitrofenoli	
2,4,6-Trimetyylifenoli	
2,4/3,5-dimetyylifenoli	
2,5-Dimetyylifenoli	
2,5-dinitrofenoli	
2,6-Dimetyylifenoli	
2,6-di-tert-butyylifenoli	
2-Metyylifenoli	
2-naftoli	
2-nitrofenoli	
3,4,5-Trimetyylifenoli	
3,4-Dimetyylifenoli	
3,4-dinitrofenoli	
3-Metyylifenoli	
3-nitrofenoli	
4-Etyylifenoli	
4-Kloori-2-Metyylifenoli	
4-Kloori-3-metyylifenoli	
4-Metyylifenoli	
4-Nitrofenoli	
Bisfenoli A	
Bisfenoli F	
Fenoli	
Hydrokinoni	
m-Etyylifenoli	
Resorsinoli	
<b>Kloorifenolit</b>	
2,3,4,5-Tetrakloorifenoli	ISO 17495 mod.; SFS-EN ISO 18857-2
2,3,4,6-Tetrakloorifenoli	
2,3,4-Trikloorifenoli	
2,3,5,6-Tetrakloorifenoli	
2,3,5-Trikloorifenoli	
2,3,6-Trikloorifenoli	
2,3-Dikloorifenoli	
2,4,5-Trikloorifenoli	
2,4,6-Trikloorifenoli	
2,4-Dikloorifenoli	
2,5- ja 2,6-dikloorifenoli	
2-Kloorifenoli	
3,4,5-Trikloorifenoli	

3,4-Dikloorifenoli	
3,5 Dikloorifenoli	
3-Kloorifenoli	
4-Kloorifenoli	
Pentakloorifenoli	
<b>Ftalaatit</b>	
Dimetyyliftalaatti (DMP)	SFS-EN ISO 18856 mod.
Dietyyliftalaatti	
Di-isobutylyliftalaatti (DiBP)	
Dibutylyliftalaatti	
Dipentylyliftalaatti	
Diheksylyliftalaatti (DHXP)	
Butyylibentsylyliftalaatti	
Dietyyliheksylyliftalaatti (DEHP)	
Di-n-oktyyliftalaatti (DNOP)	
Di-isononyyliftalaatti (DINP)	
Di-isodekylyliftalaatti (DIDP)	
<b>Alkyyliifenolit ja etoksylaattit</b>	
4-n-Nonyyliifenoli	SFS-EN ISO 18857-2 mod., ASTM D7485-16
4-Nonylphenol (isom seos)	
4-Nonyyliifenolidietoksylaatti (isom. seos)	
4-Nonyyliifenoliheksaetoksylaatti (isom. seos)	
4-Nonyyliifenolimonoetoksylaatti (isom. seos)	
4-Nonyyliifenolipentaetoksylaatti (isom. seos)	
4-Nonyyliifenolitetraetoksylaatti (isom. seos)	
4-Nonyyliifenolitrietoksylaatti (isom. seos)	
4-tert-Oktyyliifenoli	
4-tert-Oktyyliifenolidietoksilaatti	
4-tert-Oktyyliifenolimonoetoksilaatti	
4-tert-oktyyliifenolitrietoksylaatti	
<b>Torjunta-aineet</b>	
2,4'-DDD	ISO 10695, ISO/TS 28581
2,4'-DDT	
2,4'-DDE	
2,4-Dikloorifenoli	
4,4'-DDD	
4,4'-DDE	
4,4'-DDM	
4,4'-DDMU	
4,4'-DDT	
4-Kloori-2-Metyyliifenoli	
4-Kloori-3-metyyliifenoli	
Akrinatriini	
Aldriini	
alfa-Endosulfaani	
alfa-HCH	
alfa-Klordaani	
Alletriini (-D)	
Antrakiniini	
beta-Endosulfaani	

beta-HCH	
beta-Syflutriini	
Bifenatsaatti	
Bifenoksi	
Bifentriini	
delta-HCH	
Deltametriini	
Dieldriini	
Dietyylitoluamidi (DEET)	
Diklobeniili	
Dikofoli	
Endosulfaanisulfaatti	
Endriini	
Endriinialdehydi	
Endriiniketoni	
Epoksikonatsoli	
Esfenvaleraatti	
Etofumesaatti	
Etofumesaatti-2-keto	
Etylaani (etyyli-DDD, Pertaani)	
Fenotriini (cis- ja trans-)	
Fenvaleraatti	
Flusytrinaatti	
gamma-HCH (Lindaani)	
gamma-Klordaani	
HCH (heksakloorisykloheksaani)	
Heksaklooribentseeni	
Heksaklooributadieeni	
Heptakloori	
Heptaklooriepoksidi (cis)	
Isodriini	
Kaptaani	
Klooribensidi	
Klordekoni	
Klorfensoni	
Klormefossi	
Kloroneb	
Kloropropylaatti	
Klorotaloniili	
Kvintotseeni	
lambda-Syhalotriini	
Mepanipirim	
Metiokarbi	
Metoksikloori, -o,p	
Metoksikloori, -p,p	
Metoksiklooriolefiini, p,p'-	
Metolakloori (-s)	
Metyylitriklosaani	
Mirex	
Nonachlor, trans-	



Nonakloori, cis-	
Oksadiatsoni	
Oksiklordaani	
Pentakloorianisoli	
Pentaklooribentseeni	
Permetriini	
Piperonylibutoksidi	
Pirimikarbi	
Prokloratsi	
Prometryyni	
Pyrimetaniili	
Sybutryyni (Irgaroli)	
Sypermtriini	
Syprodiini	
Tau-fluvalinaatti	
Teflutriini	
Teknatseeni	
Terbutryyni	
Tetradifoni	
Tetrametriini	
Transflutriini	
Trans-Heptachlorepoxide	
Trifluraliini	
Triklosaani	
Vinklotsoliini	
Permetriini, cis-	
Permetriini, trans-	
<b>Perfluoratut yhdisteet (PFC)</b>	
Perfluorobutaanihappo (PFBA)	Sis. men. EF 4041 , LC-MS/MS
Perfluoropentaanihappo (PFPeA)	
Perfluoroheksaanihappo (PFHxA)	
Perfluoroheptaanihappo (PFHpA)	
Perfluoro-oktaanihappo (PFOA)	
Perfluorinonaanihappo (PFNA)	
Perfluorodekaanihappo (PFDA)	
Perfluoroundekaanihappo (PFUnA)	
Perfluorododekaanihappo (PFDoA)	
Perfluorotridekaanihappo (PFTrDA)	
Perfluorotetradekaanihappo (PFTA)	
Perfluoroheksadekaanihappo (PFHxDA)	
Perfluoro-oktaanidekaanihappo (PFODA)	
Perfluorobutaanisulfonaatti (PFBS)	
Perfluoropentaanisulfonaatti (PFPeS)	
Perfluoroheksaanisulfonaatti (PFHxS)	
Perfluoroheptaanisulfonaatti (PFHpS)	
Perfluoro-oktaanisulfonaatti (PFOS)	
Perfluorononaanisulfonaatti (PFNS)	
Perfluorodekaanisulfonaatti (PFDS)	
Perfluorododekaanisulfonaatti (PFDoS)	
1H,1H,2H,2H-Perfluorohexanesulfonaatti (4:2 FTS)	

1H,1H,2H,2H-Perfluoro-oktaanisulfonaatti (6:2 FTS)	
1H,1H,2H,2H-Perfluorodekaanisulfonaatti (8:2 FTS)	
<b>Lääkeaineet</b>	
4-Asetamidoantipyrine	EPA 1694
4-Formyyliaminoantipyrini	EPA 1694
5-metyyllibentsotriatsoli	EPA 1694
Amiloridi	EPA 1694
Amiodaroni	EPA 1694
Amlodipiini	EPA 1694
Amoksisilliini	EPA 1694
Ampisilliini	EPA 1694
Asetanilidi	EPA 1694
Atenololi	EPA 1694
Atorvastatiini	EPA 1694
Atsatiopriini	EPA 1694
Atsitromysiini	EPA 1694
Beklometasoni	EPA 1694
Bendroflumetiatsidi	EPA 1694
Bentsotriatsoli	EPA 1694
Betsafibraatti	EPA 1694
Bisoprololi (β-Adrenergics)	EPA 1694
Bromokriptiini	EPA 1694
Budesonidi	EPA 1694
Buspironi	EPA 1694
Dapsoni	EPA 1694
Desloratadiini	EPA 1694
Diatritsoaatti (Amidotritsoaatti)	EPA 1694
Diklofenaakki	EPA 1694
Doksisykliini	EPA 1694
Enalapriili	EPA 1694
Enroflokasiini	EPA 1694
Entakaponi	EPA 1694
Erytromysiini	EPA 1694
Febanteeli	EPA 1694
Felodipiini	EPA 1694
Felodipiini	EPA 1694
Fenatsoni	EPA 1694
Fenbendatsoli	EPA 1694
Flubendatsoli	EPA 1694
Fluoksetiini	EPA 1694
Flutamidi	EPA 1694
Fluvastatiini	EPA 1694
Fluvoksamiini	EPA 1694
Furosemiidi	EPA 1694
Gemifibrotsiili	EPA 1694
Glyburidi (Glibenklamidi)	EPA 1694
Hydroklooritiatsidi	EPA 1694
Hydrokortisoni	EPA 1694
Ibuprofeeni	EPA 1694
Ifosfamidi	EPA 1694

Iopamidoli	EPA 1694
Iopromidi	EPA 1694
Ipratropium	EPA 1694
Ivermektiini	EPA 1694
Karbamatsepiini	EPA 1694
Karvediloli	EPA 1694
Ketiapiini	EPA 1694
Ketokonatsoli	EPA 1694
Ketoprofeeni	EPA 1694
Klaritromysiini	EPA 1694
Klenbuteroli	EPA 1694
Klofibrihappo	EPA 1694
Kloksasilliini	EPA 1694
Klotsapiini	EPA 1694
Kofeiini	EPA 1694
Ksylometatsoliini	EPA 1694
Lamotrigiini	EPA 1694
Loratadiini	EPA 1694
Losartaani	EPA 1694
Meropeneemi	EPA 1694
Metoprololi	EPA 1694
Metotreksaatti	EPA 1694
Metronidatsoli	EPA 1694
Metyyliprednisoloni	EPA 1694
Mianseriini	EPA 1694
Mirtatsapiini	EPA 1694
Mometasonifuroaatti	EPA 1694
N4-Asetyyliisulfametoksatsoli	EPA 1694
Naprokseeni	EPA 1694
N-Demetyylierytromysiini A	EPA 1694
Nelfinaviiri	EPA 1694
Nitenpyram	EPA 1694
Norfloksasiini	EPA 1694
Ofloksasiini	EPA 1694
Oksitetrasykliini	EPA 1694
Oksitetrasykliini	EPA 1694
Oksymetatsoli	EPA 1694
Parasetamoli	EPA 1694
Paroksetiini	EPA 1694
Penisilliini G -bentsatiini	EPA 1694
Piperasilliini	EPA 1694
Pratsikvanteli	EPA 1694
Primidoni	EPA 1694
Propafenoni	EPA 1694
Propanololi	EPA 1694
Propyfenatsoni	EPA 1694
Pyranteeli	EPA 1694
Raloksifeeni	EPA 1694
Ramipriili	EPA 1694
Risperidoni	EPA 1694

Roksitromysiini	EPA 1694
Salbutamoli (albuteroli)	EPA 1694
Salmeteroli	EPA 1694
Sertraliini ja norsertraliini	EPA 1694
Setiritsiini	EPA 1694
Simvastatiini	EPA 1694
Siprofloksasiini	EPA 1694
Sitalopraami	EPA 1694
Sotaloli	EPA 1694
Sulfadiatsiini	EPA 1694
Sulfadimidiini (Sulfametatsiini)	EPA 1694
Sulfadoksiini	EPA 1694
Sulfaguanidiini	EPA 1694
Sulfameratsiini	EPA 1694
Sulfametitsoli	EPA 1694
Sulfametoksatsoli	EPA 1694
Sulfatiatsoli	EPA 1694
Syklofosfamidi	EPA 1694
Tamoksifeeni	EPA 1694
Terbutaliini	EPA 1694
Tetrasykliini	EPA 1694
Toremifeeni	EPA 1694
Tramadoli	EPA 1694
Triklokarbaani	EPA 1694
Trimetoprim	EPA 1694
Tylosiini	EPA 1694
Varfariini	EPA 1694
Venlafaksiini	EPA 1694
Verapamiili	EPA 1694
<b>Hormonit</b>	
Estradioli (17β-Estradioli)	EPA 539
Estrioli	EPA 539
Estroni	EPA 539
Etinyyliestradioli	EPA 539
Progesteroni	EPA 539
Testosteroni	EPA 539
Levonorgestreeli	EPA 539
Noretisteroni	EPA 539





ISBN 978-952-11-5106-4 (nid.)

ISBN 978-952-11-5107-1(PDF)

ISSN 1796-1718 (pain.)

ISSN 1796-1726 (verkkoj.)